

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra energetických zařízení**



**Petr Sitek**

**Měření součinitele přestupu tepla metodami termoanemometrie**  
(Measuring of heat transfer coefficient using hot wire anemometry)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

*Rozsah práce*

Počet stran: 41

Počet obrázků: 11

Počet grafů: 15

Počet příloh: 7

## ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá ochlazováním rovinné desky pomocí kolmo dopadajícího syntetizovaného proudu (anglicky synthetic jet, SyJ). Cílem práce je sestrojení experimentálního zařízení a proměření součinitele přestupu tepla na zahřívané desce.

Měření je prováděno pomocí anemometrie žhaveného drátku (hot wire anemometry). Součástí práce je sestrojení experimentálního zařízení, kterým se experimentálně vyšetří ochlazování zahřívané desky syntetizovaným proudem, z tohoto údaje se vypočte součinitel přestupu tepla. Součástí zařízení je hliníková deska, na které je nalepena nalepovací filmová sonda Dantec 55M47. Nad touto deskou je umístěn akční člen syntetizovaného proudu, který je připevněn na ortogonálním traverzačním zařízení umožňující pohyb akčního členu ve všech třech směrech kartézského souřadného systému.

V práci jsou uvedeny výsledky těchto experimentů:

- rychlostní profily syntetizovaného proudu, které jsou měřeny metodou anemometrie žhaveného drátku v režimu konstantní teploty,
- hodnoty součinitele přestupu tepla měřené metodou použitou Scholtenem a Murrayem [13].

Klíčová slova: součinitel přestupu tepla, anemometrie žhaveného drátku, syntetizovaný proud

## ANNOTATION

The thesis deals with cooling of a flat plate using a synthetic jet (SyJ). The aim of this work is design and construction of an experimental device and measurement of heat transfer coefficient on the heated plate.

The experiments are performed using hot wire anemometry. It is necessary to design an experimental device that enable to measure cooling of the heated plate; from this experiments heat transfer coefficient is calculated.

In this thesis, following results are presented:

- velocity profiles of the synthetic jet measured with hot wire anemometry in constant temperature mode,
- heat transfer coefficient measured with the method used in work of Schotlen and Murray [13].

Keywords: heat transfer coefficient, hot wire anemometry, synthetic jet

## Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature

V úvodu práce bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Petře Dančové, Ph.D. a konzultantovi Doc. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. za odborné vedení cenné rady a připomínky, které mi ulehčili vyřešení zadaného problému. Poděkování zaslouží i Ing. Otakar Macháček, který v laboratořích zajišťoval technickou podporu a asistoval při zprovoznění experimentálního zařízení.

Nakonec nesmím zapomenout poděkovat svým rodičům, kteří mi poskytovali finanční i jinou podporu v průběhu celého studia.

# OBSAH

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
1.1. Cíle práce .....	9
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>10</b>
2.1. Syntetizovaný proud .....	10
2.2. Přestup tepla .....	12
2.2.1. Určení součinitele přestupu tepla pomocí teorie podobnosti .....	12
2.2.2. Určení součinitele přestupu tepla pomocí termoanemometrie .....	13
2.3. Termoanemometrie.....	15
2.3.1. Princip drátkové anemometrie.....	15
2.3.2. Režimy provozu HWA.....	16
2.3.3. Výhody termoanemometrie.....	18
2.3.4. Nevýhody termoanemometrie .....	18
2.3.5. Poměr přehřátí sondy .....	19
2.3.6. Typy sond.....	19
2.3.7. Kalibrace .....	20
2.3.8. Směrová citlivost sond .....	21
<b>3. POUŽITÉ METODY ŘEŠENÍ.....</b>	<b>22</b>
3.1. Experimentální zařízení.....	22
3.2. Experimentální metody.....	23
3.2.1. Měření rychlosti pomocí CTA .....	23
3.2.2. Kalibrace sondy .....	23
3.2.3. Určení vlastní frekvence budícího členu .....	24
3.2.4. Frekvenční charakteristika .....	24
3.2.5. Měření rychlostních profilů v horizontální rovině x,z .....	24
3.2.6. Měření rychlostního profilu v ose trysky .....	24
3.2.7. Zpracování naměřených dat .....	25
3.2.8. Měření součinitele přestupu tepla .....	26
Parametry sondy a anemometru .....	26
<b>4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....</b>	<b>28</b>
4.1. Frekvenční charakteristika.....	28
4.2. Rychlostní profily v horizontální rovině x, z .....	29
4.3. Intenzita turbulence .....	33

4.4.	Rychlostní profily v ose trysky y .....	34
4.5.	Součinitel přestupu tepla .....	35
<b>5.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>38</b>
5.1	Doporučení a předpokládané směry dalšího výzkumu .....	39
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>40</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>		<b>41</b>

## POUŽITÉ VELIČINY

$A$	[m <sup>2</sup> ]	plocha, průřez
$A, B, C, D$	[1]	konstanty
$A_h$	[1]	míra přehřátí
$D, d$	[m]	průměr
$D_{\text{wire}}$	[m]	průměr drátku sondy
$E$	[J]	celková energie
$E$	[V]	elektrické napětí
$E_{\text{wire}}$	[V]	elektrické napětí drátku
$ Fo$	[-]	Fourierovo číslo
$f$	[Hz]	frekvence
$I$	[A]	elektrický proud
$L_{\text{wire}}$	[m]	délka drátku sondy
$m, n$		exponenty
$Nu$	[-]	Nusseltovo číslo
$P$	[W]	elektrický výkon
$Pr$	[-]	Prandtlovo číslo
$R_0$	[Ω]	elektrický odpor při teplotě 0°C
$R_a$	[Ω]	elektrický odpor drátku sondy při teplotě okolí
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$R_{\text{wire}}$	[Ω]	elektrický odpor drátku sondy
$S_{\text{wire}}$	[m <sup>2</sup> ]	průřez drátku
$T$	[K]	teplota
$t$	[s]	čas
$T$	[s]	doba periody ( $T = 1/f$ )
$T_a$	[K]	teplota okolní tekutiny
$T_i$	[1]	intenzita turbulence (rovnice (34))
$T_{\text{wire}}$	[K]	teplota drátku sondy
$U, u, V$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost
$x, y, z$		souřadný systém
$\alpha$	[°, rad]	úhel
$\alpha$	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla
$\sigma$	[Pa.s]	dynamická viskozita

$\nu$	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
$\rho$	$[\text{kg.m}^{-3}]$	měrná hmotnost tekutiny, hustota
$\tau$	$[\text{s}]$	dobu vytlačování tekutiny
$\chi_{\text{wire}}$	$[\Omega.\text{m}]$	měrný odpor materiálu drátku
$\beta$	$[1]$	součinitel teplotní roztažnosti

## POUŽITÉ INDEXY

mean	časově středovaný
rms	směrodatná odchylka

## POUŽITÉ ZKRATKY

CCA	constant current anemometry
CTA	constant temperature anemometry
CVA	constant voltage anemometry
HTC	součinitel přestupu tepla ( heat transfer coefficient)
HWA	hot wire anemometry
LDA	laser Dopler anemometry
PIV	particle image velocimetry
SW	software, programové vybavení počítače
SyJ	synthetic jet



# 1. ÚVOD

Tato práce se zabývá měřením součinitele přestupu tepla a inspirací pro ni byl experiment, který ve svých pracích [12,13] popsali Scholten a Murray. V jejich případě byl měřen součinitel přestupu tepla z trubky umístěné ve větrném tunelu kolmo k proudění. V této práci je použito zahřívané ploché desky, která je ochlazována pomocí syntetizovaného proudu (anglicky synthetic jet, SyJ) z kruhového výstupního otvoru (trysky) akčního členu, který dopadá kolmo na rovinu desky.

Problémem přenosu tepla a hmoty s využitím syntetizovaných proudů se zabýval Trávníček a kol. v [18], kdy pomocí naftalenové metody zjistil přenos hmoty a analogií přenosu tepla/hmoty určil přenos tepla na stěně. V této bakalářské práci byl použit akční člen syntetizovaného proudu totožné konstrukce jako v [18].

## 1.1. Cíle práce

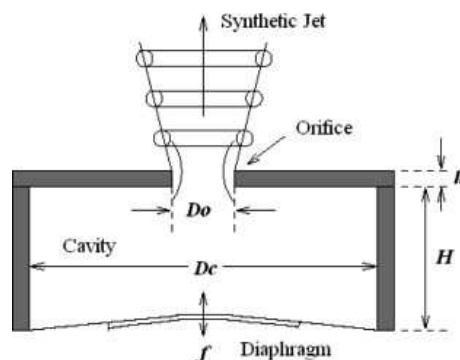
Jako hlavní cíle práce jsou vytyčeny následující:

- navržení a sestavení experimentálního zařízení pro měření součinitele přestupu tepla,
- experimentální určení součinitele přestupu tepla,
- naměření rychlostních profilů a určení intenzity turbulence syntetizovaného proudu,
- analýza naměřených dat a ověření metodiky měření součinitele přestupu tepla dle Scholtena a Murrayho, [12,13].

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. Syntetizovaný proud

Syntetizovaný proud (anglicky Synthetic jet, SyJ) je vyvolán periodickým pohybem tekutiny, kdy je tato tekutina díky kmitající pružné membráně nasávána a opět vyfukována vhodným otvorem z dutiny akčního členu [18]. Kmitání membrány je vyvoláno piezoelektricky, magneticky nebo mechanicky. Nejjednodušší případ pro představu je dutý válec, na jehož jedné podstavě je umístěna membrána kolmo k ose válce, a na straně druhé je vyvrtán otvor o mnohem menším průměru, než je samotný válec. Tento otvor tvoří vyústění z akčního členu (aktuátoru, trysky) do prostoru [21], viz obr. 2.1.



Obr 2.1 Schéma akčního členu syntetizovaného proudění [18]; cavity – dutina, orifice – otvor, diaphragm – membrána

Při stlačení membrány do válce dojde k vytlačení vírového prstence, pro ilustraci jde o stejný princip jako při vyfukování kouřových koleček z cigaretového dýmu, [4]. Tento vírový prstenec sebou strhává okolní tekutinu a tím vyvolává proudění. Kmitání membrány musí mít dostatečnou amplitudu a frekvenci, aby nedošlo k opětovnému nasátí prstence do prostoru trysky. Ačkoliv je hmotnostní tok tekutiny v ose výstupního otvoru z akčního členu nulový, výsledná rychlost z trysky je nenulová [5].

Mezi hlavní výhody syntetizovaných proudů patří absence přívodního potrubí pro tekutinu. Výhodou je i jednoduchá konstrukce akčního členu, která přináší výhody při miniaturizaci a aplikaci ve stísněných prostorech. V případě že je akční člen oddělen membránou od média, je možno trysku použít jednoduše i ve vodě, znečištěné nebo agresivní tekutině (pokud je membrána z materiálu odolného proti použité tekutině). Další výhodou, která je využívána v praxi, jsou příznivé termodynamické vlastnosti, využívané při chlazení, způsobené turbulentním charakterem proudu.

Přestože tento typ proudění je zkoumán již mnoho let, název „Synthetic jet“ poprvé použili R.D. James, J.W. Jacobs, A. Glezer ve své práci *A round turbulent jet produced by an oscillating diaphragm*, Phys. Fluids, Vol. 8, No. 9 (1996), 2484–2495 [9].

Do češtiny termín „Synthetic jet“ poprvé přeložil jako „syntetizovaný proud“ Z. Trávníček v pracích [16, 17].

Hlavními parametry syntetizovaného proudu jsou:

- časově středovaná rychlost v otvoru trysky během vytlačování tekutiny  $U_0$ :

$$U_0 = f \int_0^{\frac{T}{2}} u_0(t) dt \quad (1),$$

kde  $f$  (Hz) je frekvence buzení akčního členu,  $u_0$  (m/s) je rychlost v otvoru trysky.

- Délka sloupce vytlačené tekutiny  $L_0$ ,

$$L_0 = U_0 * T \quad (2),$$

kde  $T$  je perioda pohybu budícího členu.

- Reynoldsovo číslo:

$$\text{Re} = \frac{U_0 D}{\nu} \quad (3),$$

kde  $D$  (m) je průměr trysky (m) a  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) je kinematická viskozita tekutiny [15].

## 2.2. Přestup tepla

Přestup tepla je mechanismus přenosu tepla z povrchu pevné látky do látky plynné či kapalné [23]. Toto sdílení tepla je kombinací konvekce (přenosu tepla prouděním) a kondukce (přenosu tepla vedením). Množství tepla může být stanoveno podle Fourierova zákona:

$$q = -\lambda \int_0^A \text{grad } t \, dA \quad (4),$$

kde  $q$  [W] je množství sdíleného tepla,  $\lambda$  [W.°C<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>] je tepelná vodivost proudící tekutiny,  $A$  [m<sup>2</sup>] je ohřívaná plocha.

Využití tohoto vztahu není však pro praktické výpočty možné. K řešení rovnice (4) je nutno znát hodnotu teplotního gradientu i stěny a jeho průběh podél celé ohřívací plochy  $F$ , což však není předem známo. Proto se u praktických výpočtů vyjadřuje množství tepla podle Newtonova vzorce[11]:

$$Q = \alpha A \Delta T \quad (5).$$

Do tohoto vztahu je třeba již získat jen součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , který lze v jednodušších případech vypočítat z teorie podobnosti nebo určit experimentálně. Experimentálním zjištěním součinitele přestupu tepla se zabývá převážná část této práce. Přestup tepla je závislý především na teplotním gradientu mezi ohřátým povrchem a proudícím médiem ( $\Delta T$ ) tepelné vodivosti ( $\lambda$ ), charakteru proudění, viskozitě ( $\nu$ ), hustotě ( $\rho$ ) a mnoha dalších faktorech. Tyto vlastnosti jsou popsány podobnostními čísly.

### 2.2.1. Určení součinitele přestupu tepla pomocí teorie podobnosti

Součinitel přestupu tepla lze určit také jako funkce podobnostních čísel. Tyto čísla vyjadřují podobnost tepelných a mechanických vlastností kapalin [11]:

$$\text{Nu} = f(\text{Fo}, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}) = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (6),$$

kde  $\text{Fo}$  je Fourierovo číslo, které reprezentuje nestacionární přestup tepla [19]:

$$\text{Fo} = \frac{\lambda \tau}{l^2} \quad (7),$$

kde  $\lambda$  (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) je tepelná vodivost,  $\tau$  (N.m<sup>-2</sup>) je smykové napětí a  $l$  (m) je charakteristický rozměr.

Reynoldsovo číslo ( $\text{Re}$ ) vyjadřuje poměr sil setrvačných a vazkých:

$$\text{Re} = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (8),$$

kde  $\rho$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) je hustota,  $v$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) je rychlost,  $l$  (m) je charakteristický rozměr a  $\mu$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) je dynamická viskozita.

Grashofovo kritérium (Gr) vyjadřuje tepelně mechanické vlastnosti tekutiny pro samovolné proudění:

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t \quad (9),$$

kde  $\beta$  ( $\text{K}^{-1}$ ) je součinitel objemové roztažnosti,  $g$  ( $\text{m.s}^{-2}$ ) je tíhové zrychlení,  $\nu$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) je kinematická viskozita a  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) je teplotní gradient.

Prandtlovo kritérium (Pr) vyjadřuje fyzikální vlastnosti tekutiny, poměrem přenosu hybnosti viskozními silami a transportem tepla vedením:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (10),$$

kde  $c_p$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku,  $\nu$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) je kinematická viskozita,  $\mu$  ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) je dynamická viskozita,  $\lambda$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) je tepelná vodivost,  $a$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ) je součinitel teplotové vodivosti.

Pro jednodušší případy lze vyjádřit vztah těchto podobnostních čísel a poté ho používat pro geometricky podobné případy. U složitějších případů přestupu tepla jsou tyto matematické vztahy příliš složité, a proto se používají experimentální metody.

### 2.2.2. Určení součinitele přestupu tepla pomocí termoanemometrie

Součinitel přestupu tepla lze určit rozdílem tepla generovaného se zapnutým zdrojem proudění a teplem generovaným drátovou sondou při vypnutém proudění. Teplo při vypnutém i zapnutém proudění má stejné ztráty akumulací, radiací a vedením, mění se pouze odběr tepla způsobený konvekcí (prouděním), [12]:

$$Q_{diss} = (V_{bridge}^2 - V_0^2) \frac{R_{senzor}}{(R_{arm} + R_{top})^2} \quad (11).$$

Měrný tepelný tok lze získat vydělením disipativního tepla efektivní plochou sondy, má hodnotu 1,5 násobku plochy filmu [2]. Poté je nutné zjistit teplo odvedené do desky. To je zjištěno pomocí zvláštní sondy na to určené nebo termočlánkem umístěným pod nalepovací filmovou sondu, s níž se měří rozdíl teplot mezi filmem filmové sondy a termočlánkem oddělených od sebe folií. Teplo odvedené konvekcí poté zjistíme podle vztahu:

$$q_{cond} = k_{folie} \frac{(T_{surface} + T_{o,surface})}{\delta} \quad (12),$$

kde  $k$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) je součinitel tepelné vodivosti,  $\delta$  (m) je tloušťka folie.

Teplo odvedené konvekcí je součtem disipativního tepla a tepla odvedeného kondukcí:

$$q_{conv} = q_{cond} + q_{diss} \quad (13).$$

Součinitel přestupu tepla je získán vydělením konvekcí odvedeného tepla a rozdílu teplot mezi drátkem a proudící teplotou:

$$h = \frac{q_{conv}}{(T_w - T_\infty)} \quad (14).$$

V případě, že není nutné přesné měření, neprovádí se korekce, ale nastaví se minimální přehřátí do 3 °C a měření je dostatečně přesné pro představu velikosti součinitele tepla.

## 2.3. Termoanemometrie

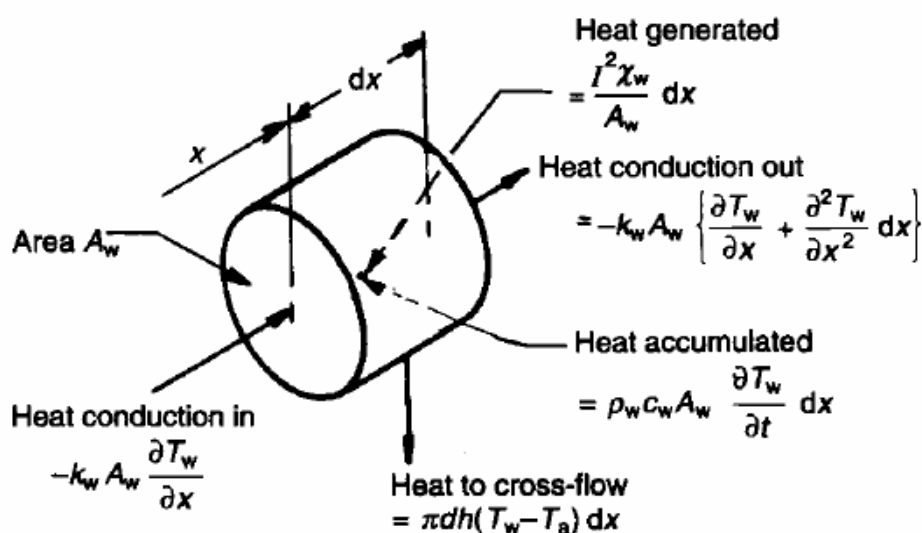
Termoanemometrie je způsob měření rychlosti tekutin na principu konvektivního přenosu tepla ze zahřívaného tělesa – čidla, např. žhaveného drátku (hot wire anemometry, HWA), nebo filmu (hot film anemometry, HFA) do proudící tekutiny. Přenos tepla z drátku konvekcí je primárně závislý na rychlosti tekutiny [3], dále je závislý na fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny (viskozitě, tepelné vodivosti, teplotě, apod.). Závislost na těchto veličinách je ošetřena kalibrací a teplotní korekcí. Díky miniaturním rozměrům lze přesně provést přesné bodové měření, a to i velmi malých rychlostních fluktuací. Při měření je buď udržováno konstantní napětí na drátku a je měřen odpor drátku s měnící se teplotou (constant current anemometry, CCA), nebo je udržována konstantní teplota drátku a je měřeno napětí (constant temperature anemometry CTA).

### 2.3.1. Princip drátkové anemometrie

Měření je prováděno sondou, resp. tenkým drátem (většinou wolframový), který je ohříván průchodem elektrického proudu tzv. Joulovým teplem (3):

$$d\dot{Q}_e = \frac{I\kappa_w}{A_w} dx \quad (15),$$

kde  $I$  (A) je protékající proud,  $\kappa_w$  ( $\Omega \cdot m^2$ ) je měrný odpor vodiče,  $A_w$  ( $m^2$ ) je průřez vodiče.



Obr 2.2 Teplotní balance elementu drátku [3]

Celkové teplo  $d\dot{Q}_e$  generované v drátku o délce  $dx$  se rovná součtu tepla přeneseného konvekcí  $d\dot{Q}_{fc}$  do okolí, tepla přeneseného kondukcí  $d\dot{Q}_c$  do držáku, tepla na drátku akumulovaném  $d\dot{Q}_s$  a tepla vyzářeného do okolí  $d\dot{Q}_r$ :

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s \quad (16).$$

Teplo odvedené konvekcí (prouděním) tekutiny lze vypočítat z Newtonova vztahu (5):

$$d\dot{Q}_{fc} = \pi d \alpha (T_w - T_a) dx \quad (17),$$

kde  $d$  (m) je průměr drátku,  $\alpha$  ( $\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) je součinitel přestupu tepla,  $T_w$  teplota drátku a  $T_a$  je teplota vzduchu proudícího z trysky ( $^\circ\text{C}$ ).

Teplo odvedené kondukcí (vedením) tepla do drátu:

$$d\dot{Q}_c = -\lambda_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx \quad (18),$$

kde  $\lambda_w$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je tepelná vodivost drátu,  $A_w$  ( $\text{m}^2$ ) průřez drátu.

Teplo odevzdané radiací do okolního prostředí (ve většině případů je rozdíl teplot velmi malý, a proto je teplo odvedené radiací zanedbatelné):

$$d\dot{Q}_r = d\sigma\pi\varepsilon(T_w^4 - T_a^4)dx \quad (19),$$

kde  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ),  $\varepsilon$  je emisivita (1).

Teplo spotřebované akumulací tepla:

$$d\dot{Q}_s = \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (20),$$

kde  $\rho_w$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) je hustota drátku,  $c_w$  ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je měrná tepelná kapacita materiálu drátku,  $A_w$  ( $\text{m}^2$ ) průřez drátu.

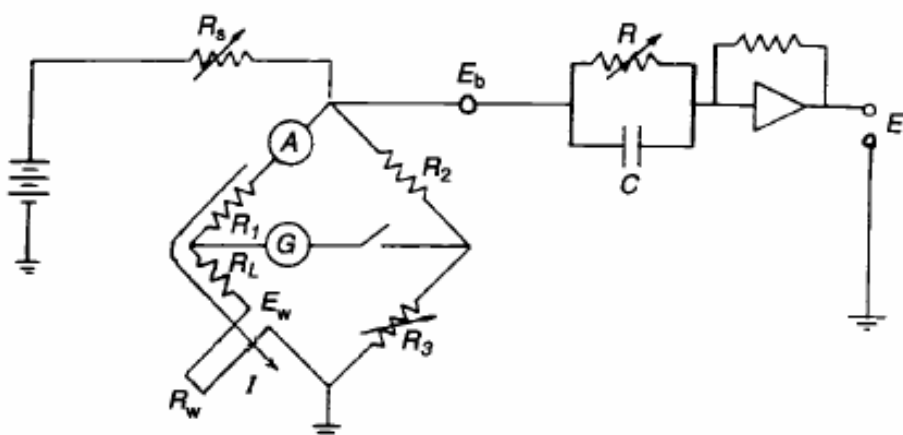
### 2.3.2. Režimy provozu HWA

Režim CCA (constant current anemometry): v tomto režimu je udržován konstantní proud protékající přes vlákno drátkové sondy. Při změně rychlosti proudění se změní teplota a tím i odpor vlákna sond. Z Ohmova zákona:

$$I = \frac{U}{R} \quad (21)$$

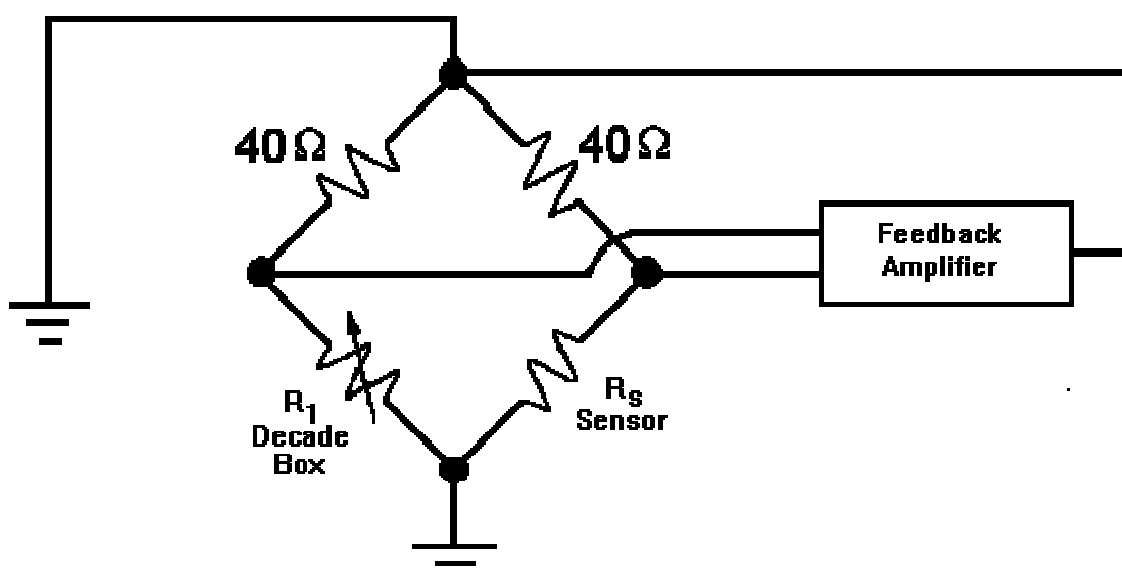


pak vyplývá, že se změní i napětí. Tento režim je vhodný především k měření teplot a rychlých změn teploty.



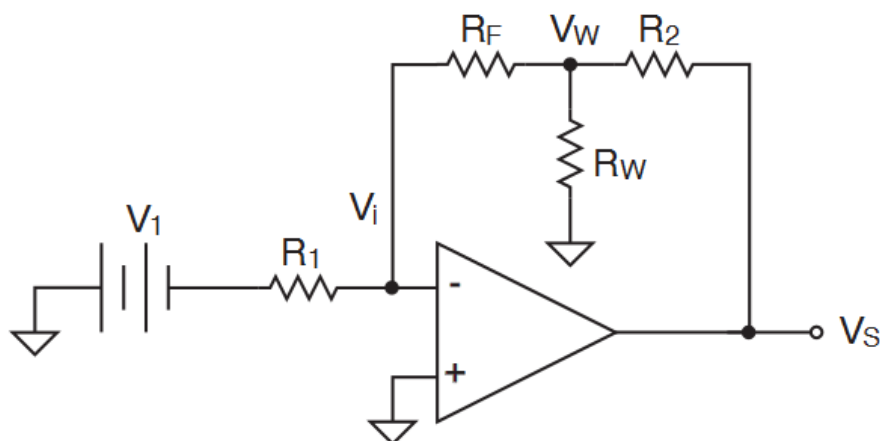
Obr. 2.3 Schéma zapojení anemometru v režimu CCA

Režim CTA (constant temperature anemometry): v tomto režimu je udržován konstantní odpor drátu a tím i konstantní teplota. Při změně rychlosti proudění dojde ke změně teploty drátu sondy a tím i změně odporu. Na můstku pak dojde k nerovnováze (chybě), která je vyrovnávána pomocí servozesilovače. Tento režim je vhodný především k měření rychlostí a jejich fluktuací.



Obr. 2.4 Schéma zapojení anemometru v režimu CTA

Režim CVA (constant voltage anemometry): v tomto režimu pracuje nově vyvinutý anemometr pro vysoce výkonné měření proudění a měření rychlostních a teplotních fluktuací v reálném čase. Na obrázku (2.5) je obvod s operačním klopným zesilovačem, který je napojený na zpětnovazebnou smyčku [19]. Pomocí odporů  $R_F$ ,  $R_1$  a zdroje napětí  $V_1$  je nastaveno napětí  $V_W$ , které zůstává konstantní, při změně odporu vlákna drátkové sondy dojde ke změně napětí  $V_S$ . Kalibrace je prováděna jako závislost  $V_S$  na teplotě nebo rychlosti podle měřených veličin.



Obr. 2.5 Jednoduchý CVA obvod [11]

### 2.3.3. Výhody termoanemometrie

Mezi hlavní výhody termoanemometrie patří nízká cena oproti jiným srovnatelným metodám měření rychlosti proudění (např. particle image velocimetry PIV, laser Doppler anemometry LDA). Výhodou je i analogové výstupní napětí, díky kterému se neztrácejí, či nezkrasují naměřená data při cestě do PC. Sondy jsou schopny pracovat při vysoké vzorkovací frekvenci a tím dosáhnou vysokého prostorového rozlišení. Další výhodou je snadné použití a malé rozměry sond.

### 2.3.4. Nevýhody termoanemometrie

Hlavní nevýhodou je umístění sondy do proudící tekutiny, která tak může značně ovlivnit proudění. Mohou tak vznikat turbulence za drátkem, nebo se při nízké tuhosti držáku může rozkmitat samotná sonda a tím dojít k nechtěnému zkreslení měření [10].

Při měření v kapalinách (např. ve vodě) může docházet k tvorbě bublinek na povrchu drátku a tím znemožnit přestup tepla do kapaliny a výrazně ovlivnit měření. Toto ovlivnění může být způsobeno např. varem kapaliny při překročení bodu varu kapaliny v případě nastavení příliš velkého poměru přehřátí.

Při měření v agresivních kapalinách může drátek oxidovat nebo se zanášet nečistotami a tím se sníží přestup tepla, čímž opět dochází ke zkreslení výsledků. Drátkové sondy jsou také velmi křehké, proto může dojít při manipulaci k přetržení drátku sondy.

### 2.3.5. Poměr přehřátí sondy

Poměrem přehřátí sondy je dána pracovní teplota drátku čidla. Poměr přehřátí je poměr odporu sondy při pracovní teplotě  $R_W$  k odporu drátku při teplotě okolí  $R_A$  [10]:

$$A = \frac{R_W}{R_A} \quad (22).$$

Čím vyšší je míra přehřátí, tím větší je přesnost měření, protože dochází k mnohem intenzivnějšímu konvektivnímu přenosu tepla. Na druhou stranu nesmí být koeficient přehřátí příliš vysoký, aby se nepřekročila maximální provozní teplota sondy udávána výrobcem, nebo aby nedošlo k překročení materiálového maxima (oxidace a následné přehorení drátku). Přehřátí nesmí být také příliš vysoké, pokud je měření prováděno v kapalině, aby nedocházelo ke vzniku bublinek nebo varu kapaliny na povrchu drátku.

Výslednou teplotu drátku lze vypočítat ze vztahu (23), kde hodnoty  $R_{20}$  a  $\alpha_{20}$  (udávány výrobcem) jsou uvedeny na obalu sondy.

$$R_W = R_{20} * [1 + \alpha_{20}(T_W - T_{20})] \quad (23).$$

Pro experimenty popsané v této práci byla pro měření rychlostních profilů použita sonda DANTEC 55P11. S těmito parametry:  $R_{20} = 3,33 \, \Omega$  a  $\alpha_0 = 0,0036 \, ^\circ\text{C}^{-1}$ . Pro poměr přehřátí  $A = 1,5$  byl pak odpor zahřátého drátku  $R_W = 4,995 \, \Omega$ . Po dosazení vztahu (23) je získána teplota drátku  $T_W = 158,89 \, ^\circ\text{C}$ .

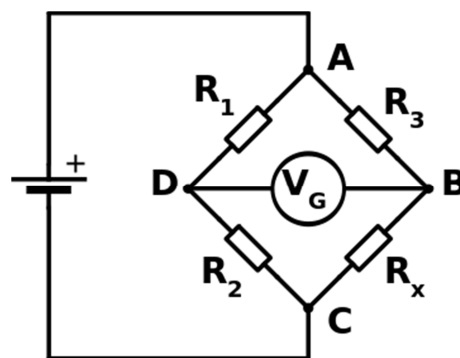
Přezhavení se nastavuje na dekadovém odporu Wheatstoneova můstku (obr. 2.6). Při použití programu Streamware 3.01 se zadá pouze poměr přehřátí sondy a software automaticky nastaví hodnotu dekadového odporu a vypočte pracovní teplotu drátové sondy. Dekádový odpor lze také vypočíst z Kirchhoffova zákona:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \quad (24),$$

kde  $R_2$  je hledaný dekadový odpor a  $R_x$  je odpor na drátkové sondě. Aby byl můstek vyrovnaný (mezi D a B neprotéká proud), musí platit vztah (24):

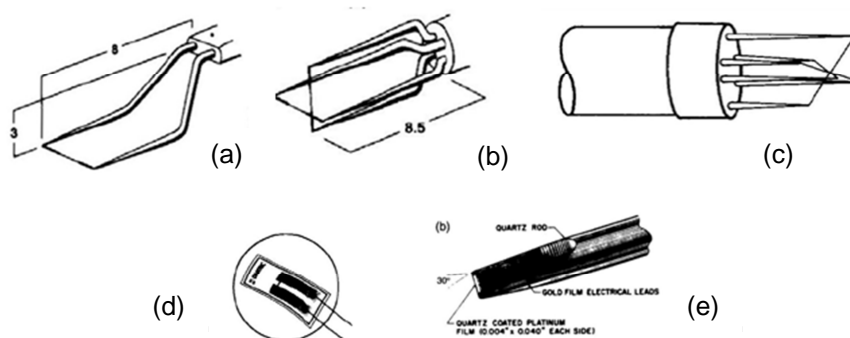
### 2.3.6. Typy sond

Nejdůležitější částí drátkové sondy je tenký odporový drátek upnutý mezi držáky, které jsou



Obr. 2.6 Wheatstoneův měřicí můstek

různě tvarované pro použití v různých situacích. Sondy jsou tvořeny jedním dvěma nebo třemi drátky, kterými lze měřit jednu, dvě nebo tři složky proudění. U více drátkových sond jsou drátky vůči sobě natočeny v různých úhlech a podle směrové citlivosti každého drátku lze určit jednotlivé složky proudění v souřadném systému x,y,z.



Obr. 2.7 (a) Jednodrátková, (b) dvoudrátková, (c) třídrátková, (d) filmová nalepovací, (e) filmová sonda, [3]

Dalším typem sond jsou sondy filmové. Tyto sondy jsou na rozdíl od drátkových sond tvořeny tenkým kovovým filmem, který je většinou nanesen galvanickým pokovováním na nevodivý materiál (zpravidla na křemíkový podklad). Plocha, na kterou je nanesena kovová vrstva, může mít různý tvar podle použití. Např. pro bodové měření může být film nanesen na špičku jehlanu.

Pro měření součinitele přestupu tepla v této práci je využita nalepovací filmová sonda Dantec 55R47.

### 2.3.7. Kalibrace

Kalibrace je prováděna za účelem získání matematické závislosti rychlosti nebo teploty proudění na výstupním napětí z Wheatstoneova můstku dle použitého režimu provozu a hledané veličině. Při kalibraci je sonda vystavena proudění se známou rychlostí a k ní je přiřazeno příslušné napětí, které bylo na sondě naměřeno. Pro přesnou kalibraci se doporučuje naměřit nejméně 10 bodů. Po získání dostatečného počtu bodů je za pomoci SW provedena interpolace a vypočteny kalibrační konstanty [10].

Kalibrace může být provedena pomocí kalibračního zařízení dodávaného výrobcem sond, ve větrném tunelu s referenční Prandtlovou trubicí, nebo pomocí tažné nádrže s pohonem držáku s regulací rychlosti pohybu [5].

Funkce popisující matematickou závislost mezi rychlostí a napětím se nazývá ochlazovací zákon. Často využívaným ochlazovacím zákonem je Kingův zákon [3]:

$$E^2 = A + BU^n \quad (25),$$

kde  $U$  je rychlost,  $E$  je naměřené napětí na můstku,  $A$ ,  $B$  jsou kalibrační konstanty a  $n$  exponent, jehož velikost určil King na hodnotu  $n = 0.5$  [3]. Později byl exponent zpřesněn

Collisem a Williemsena  $n = 0.45$  [3], ten platí přesně pro nižší hodnoty Reynoldsova čísla a pro nízké fluktuace. V těchto případech se exponent upravuje pro konkrétní situaci [3].

Dalším často používaným ochlazovacím zákonem je polynomická křivka od George [7]:

$$U = A + BE + CE^2 + DE^3 \dots \quad (26).$$

Zde je rychlost  $U$  vyjádřena jako závislost výstupního napětí  $E$ . S rostoucím řádem polynomické křivky se zvyšuje přesnost interpolace.  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  jsou kalibrační konstanty, které se určují interpolací či regresí.

Přesnější polynomickou křivku, jejíž mocninný základ je napětí na druhou  $E^2$ , navrhl Swaminathan [15]:

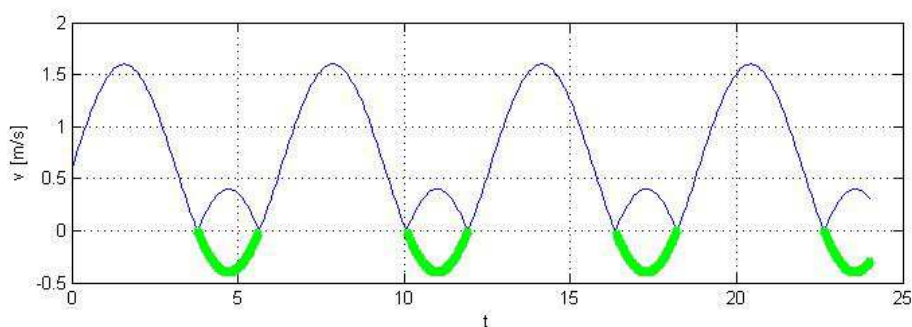
$$U = A + BE^2 + C(E^2)^2 + D(E^2)^3 + \dots \quad (27).$$

### 2.3.8. Směrová citlivost sond

Při natočení sondy jinak než kolmo k proudění dochází k nižšímu přenosu tepla z drátku a tím je naměřena nižší rychlost proudění, než ve skutečnosti je. Rychlost naměřená kolmo k drátku, která způsobí stejné ochlazení jako daná rychlost v obecném směru, se nazývá efektivní rychlost [10]. Tato rychlost se vypočte jako součet normálové a tečné rychlosti, kde  $k$  je určeno směrovou kalibrací sondy:

$$U^2 = W_n^2 + k^2 W_t^2 = W^2(\sin^2 \varphi + k^2 \cos^2 \varphi); 0 \leq k^2 \leq 1 \quad (28).$$

V některých případech, ve kterých se mění směr rychlosti proudění, měří drátové sondy pouze absolutní velikost rychlosti proudění. Tyto případy nastávají, pokud se měří blízko stěny a dochází zde ke zpětným vírům, nebo případě SyJ, kdy dochází v blízkosti trysky k fázi nasávání a výfuku. V této situaci je třeba si signál upravit pomocí vlastním algoritmem pro jednotlivé typy proudění.



Obr. 2.8 Úprava naměřeného signálu;  
modrá křivka představuje data je naměřená anemometrem, zelená je skutečná rychlost upravená SW

### 3. POUŽITÉ METODY ŘEŠENÍ

#### 3.1. Experimentální zařízení

Použité experimentální zařízení je na obr. 3.1 a je tvořeno:

- budícím členem složeným ze dvou reproduktorů značky TVM typ ARN-100-10/4,
- generátorem signálu Tektronix AFG3102,
- zesilovačem Omnitronic MPZ -180
- anemometrické měřící aparaturou Dantec StreamLine 90N10 Frame,
- A/D převodníku firmy Industrialinstruments CA-1000,
- traverzačního zařízení umožňující pohyb ve všech souřadnicích kartézského souřadného systému,
- držákem trysky vlastní konstrukce,
- propojovacími kabely a adaptéry,
- ampérmetrem a voltmetrem,
- nalepovací filmová sonda Dantec 55R47,
- drátková sonda Dantec 55P11.



Obr. 3.1 Experimentální zařízení

Prvním úkolem pro začátek měření bylo navržení držáku k připevnění budícího členu k traverzačnímu zařízení a navržení podstavce s úchyty pro hliníkovou desku, na níž bude nalepena sonda k měření. Akční člen syntetizovaného proudu byl použit již vyrobený, viz [18]. Budící člen se skládá ze dvou naproti sobě postavených reproduktorů ARN-100-10/4 spojených hliníkovou přírubou širokou 20 mm, přes kterou jsou provlečeny 4 šrouby, které reproduktory a přírubu drží pohromadě a které jsou použity i k přichycení k držáku pro traverzační zařízení, viz obr. 3.1. Kolmo na osu reproduktorů je vyveden výstupní otvor z akčního členu o průměru 10 mm, který je při experimentech HTC obrácen směrem kolmo dolů na desku.

Podstavec je tvořen vyvýšeným plechem, který umožňuje mechanismu traverzačního zařízení zajet i pod desku, a tím mít větší manévrovací schopnosti. Na desce jsou umístěny díry pro příložníky, které desku drží na místě.

Sonda na desce je připevněna pomocí oboustranné lepicí pásky. Přilepení oboustrannou lepicí páskou je dle [24] pro nízké rychlosti dostačující. Toto připevnění umožňuje jednoduchou demontáž bez použití nástrojů či větší síly a tím se zabrání případnému poškození sondy. Vývody ze sondy jsou připájeny na měděné kabely, které vedou do CTA anemometru, z měřícího můstku je vyveden kabel do A/D převodníku, který je připojen na PC, kde dochází k uložení dat ze sondy.

## **3.2 Experimentální metody**

### **3.2.1. Měření rychlosti pomocí CTA**

Měření rychlostí bylo prováděno drátkovou sondou Dantec 55P11 v režimu CTA, kdy je udržována konstantní teplota drátku během změn rychlosti proudění za pomoci servo zesilovače, který upraví napětí na můstku. Toto napětí je potom sledováno a je ukládáno přes A/D převodník do počítače.

Nastavení anemometru, měřících parametrů a ukládání dat bylo provedeno pomocí SW Streamware 3.01.

### **3.2.2. Kalibrace sondy**

Pro přesné měření je nutná kalibrace nejlépe před a po měření pro zjištění, zdali se sonda nepoškodila, nezažehla či nezoxidovala. V našem případě bylo použito kalibračního zařízení DantecStreamline 90H02 Flow unit. Naměřené body byly proloženy polynomickou křivkou čtvrtého řádu:

$$U = C_0E^0 + C_1E^1 + C_2E^2 + C_3E^3 \quad (29).$$

Proložení křivkou a vypočtení kalibračních konstant bylo provedeno pomocí programu StreamWare 3.10. Kalibrační konstanty byly stanoveny takto:

$$\begin{aligned}C_0 &= -35.957413 \\C_1 &= 81.22525 \\C_2 &= -62.89016 \\C_3 &= 16.64119\end{aligned}$$

### 3.2.3. Určení vlastní frekvence budícího členu

Vlastní frekvenci lze zjistit více způsoby: jednak teoretickým výpočtem z přeměny energií, kdy je také nutné znát tuhost membrány, nebo experimentálně pomocí frekvenční charakteristiky. V našem případě byla vlastní frekvence určena experimentálně. Pomocí frekvenční charakteristiky, kdy byla za konstantního výkonu postupně měněna frekvence buzení a měřena střední rychlost proudění.

### 3.2.4 Frekvenční charakteristika

Pomocí frekvenční charakteristiky byla zjištěna vlastní frekvence akčního členu syntetizovaného proudění, tj. frekvence buzení, při které je při zachování konstantního výkonu dosaženo nejvyšší časově středované rychlosti proudění.

Rychlost proudění byla měřena jednodrátkovou sondou Dantec 55P11 v ose trysky ve vzdálenosti  $y/D = 2$ . Výkon akčního členu byl měřen pomocí standartních multimetrů - jedním bylo měřeno elektrické napětí dodávané ze zesilovače a druhým elektrický proud protékající reproduktory. Výsledný výkon byl spočten vztahem pro výkon:

$$P = V * I \quad (30),$$

kde  $V$  je napětí a  $I$  je proud. Výkon byl udržován na konstantní hodnotě 1,14 W.

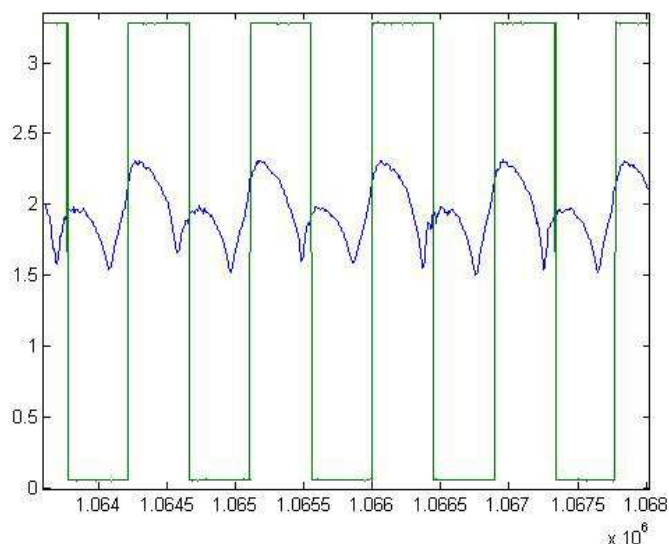
### 3.2.5 Měření rychlostních profilů v horizontální rovině x,z

Měření bylo provedeno v rovině kolmé na osu trysky v různých vzdálenostech  $y/D$ . Zhotoveny byly 4 rychlostní profily ve vzdálenosti  $y/D = 0.2, 1, 2$  a  $4$  od trysky. Počet vzorků byl nastaven na 32 768 a vzorkovací frekvence na 64 kHz, z toho vyplývá, že čas experimentu je  $t_{\text{exp}} = 32768/64000 = 0,512$  s pro jeden měřený bod. Pro frekvenci buzení 72 Hz je to 38,4 vzorku, což se při zpracování výsledků ukázalo jako dostačující.

### 3.2.6. Měření rychlostního profilu v ose trysky

Měření bylo provedeno v geometrické ose trysky. Rychlosti byly změřeny od ústí trysky až do vzdálenosti  $y/D = 22$ . Vzorkovací frekvence a počet vzorků byly použity stejné jako v horizontální rovině.





Obr. 3.2. Záznam napětí s TTL signálem

### 3.2.7. Zpracování naměřených dat

Společně se signálem z CTA můstku byl změřen TTL signál. TTL signál se skokově mění mezi hodnotou 0,1 a 3,2. Jedna perioda TTL signálu odpovídá jedné periodě pracovního cyklu budícího členu. Tento signál je využit k rozfázování průběhu pracovního cyklu. Každá perioda je rozdělena na 10 kusů a v jedné desetině je vypočtena střední hodnota. Zpracování dat bylo provedeno pomocí programu Matlab s použitím vlastního programu, viz příloha 7. Napětí bylo přepočteno na rychlost pomocí programu Excel:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (31).$$

Obrázek (3.2.) ukazuje TTL signál a záznam napětí z můstku, toto měření je provedeno ve vzdálenosti  $y/D=0,2$  od ústí trysky a proto je zde vidět i to že sonda není schopna měřit záporné hodnoty rychlosti, ale pouze absolutní hodnoty. Identifikace a přepočtení napětí do záporných hodnot se ukázalo jako velmi obtížné a proto bylo ponecháno v kladných hodnotách.

Hodnoty rychlostí v grafech jsou uvedeny jako bezrozměrná jednotka vztažená ke konstantní hodnotě časově středované rychlosti v otvoru trysky během vytlačování tekutiny  $U_0$ :

$$U_0 = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{T/2} u_0(t) \quad (32),$$

rychlost je potom uvedena ve tvaru  $\bar{U}/U_0$ .

### 3.2.8. Měření součinitele přestupu tepla

Pro měření HTC bylo použito nalepovací sondy Dantec 55R47. V každé vzdálenosti desky od budícího členu byly provedeny tři druhy experimentů se třemi různými poměry přezhavení. Při měření byla nastavena vzorkovací frekvence na 3 kHz a počet vzorků na 4096 z toho vyplývá, že čas experimentu je  $t_{\text{exp}} = 4096/3000 = 1,36$  s pro jeden měřený bod. Pro frekvenci buzení 30 Hz je to 40,8 pracovních cyklů. Budící člen byl napájen sinusovým signálem a frekvenci 30 Hz o výkonu  $P = 1,6$  W.

Naměřené signály byli pomocí programu Excel, přepočteny na disipativní energii přenesené konvekcí do proudění. Výsledný součinitel přestupu tepla je poté určen regresí, kde funkce  $x$  je poměr  $T_w/T_a$  a souřadnice  $y$  je disipativní energie která přechází do vzduchu. Tyto hodnoty jsou proloženy exponenciální křivkou. Tato operace byla provedena v programu Excel za pomoci funkce LOGLINREGRESE:

$$y = b \cdot m^x \quad (33).$$

Výsledná hodnota součinitele přestupu tepla je potom  $y$  pro  $x = 1$ . V tomto případě nepřechází žádné teplo do desky a není třeba teplotní korekce, viz kap 2.2.2.

#### Parametry sondy a anemometru

##### Parametry konstantní

- |   |  |
|---|--|
| • odpor sondy při 20°C                    | $R_{20} = 10,97 \, \Omega$                   |
| • teplotní součinitel elektrického odporu | $\alpha_{20} = 0,316 \, \%/^{\circ}\text{C}$ |
| • plocha filmu sondy                      | $(0,1 \times 0,9) \, \text{mm}$              |
| • odpor aktivní větve můstku              | $R_{\text{top}} = 20 \, \Omega$              |
| • odpor držáku                            | $R_{\text{hold}} = 0,2 \, \Omega$            |
| • odpor kabelu                            | $R_{\text{cable}} = 0,5 \, \Omega$           |

##### Přehřátí 0,1

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| • teplota drátku                                 | $T_w = 28,57 \, ^{\circ}\text{C}$     |
| • odpor sondy                                    | $R_{\text{Tw}} = 11,798976 \, \Omega$ |
| • napětí na můstku při nulové rychlosti proudění | $E_0 = 1,163 \, \text{V}$             |

##### Přehřátí 0,2

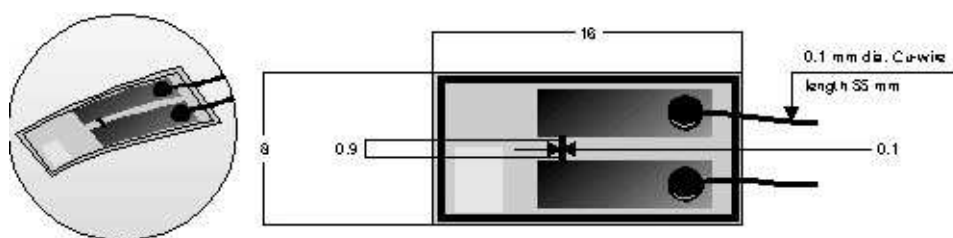
- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| • teplota drátku                                 | $T_w = 57,14 \, ^{\circ}\text{C}$    |
| • odpor sondy                                    | $R_{\text{Tw}} = 12,78367 \, \Omega$ |
| • napětí na můstku při nulové rychlosti proudění | $E_0 = 1,591 \, \text{V}$            |

##### Přehřátí 0,3

- |                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| • teplota drátku | $T_w = 85,71 \, ^{\circ}\text{C}$    |
| • odpor sondy    | $R_{\text{Tw}} = 13,06837 \, \Omega$ |

- napětí na můstku při nulové rychlosti proudění  $E_0 = 1,892 \text{ V}$

Z těchto parametrů poté vypočteme disipativní energii dle vzorce (11).



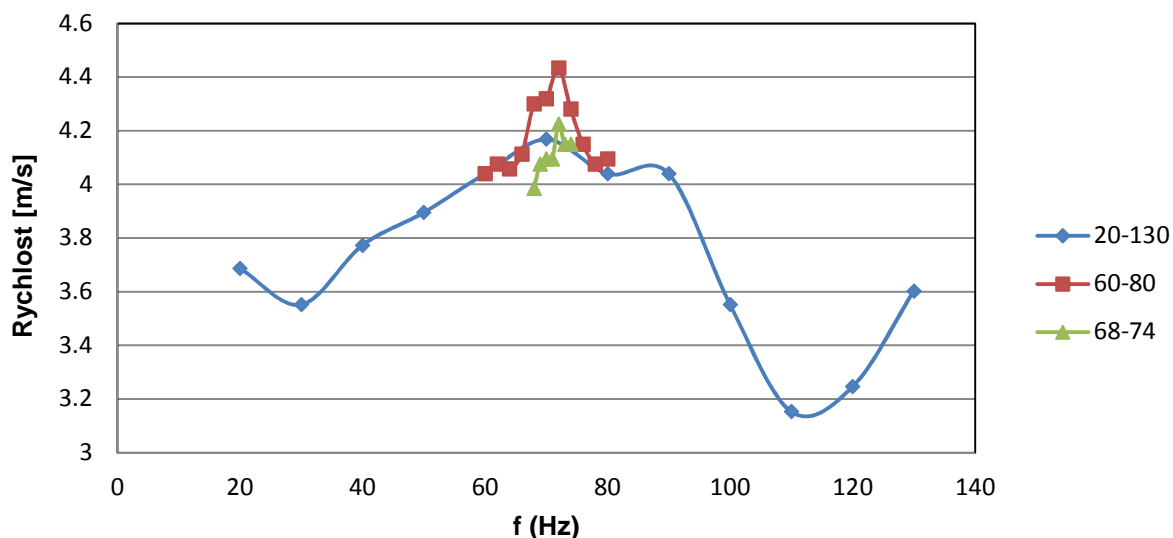
Obr .3.3 Nalepovací sonda Dantec 55R47

## 4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 4.1. Frekvenční charakteristika

Nejdříve bylo provedeno měření rychlosti v širokém spektru frekvencí pro přibližné určení hledané hodnoty, a to mezi 20 Hz a 130 Hz v krocích po 10 Hz. Nejvyšší rychlost byla nalezena kolem hodnoty 70 Hz. Proto byla měření opakována v nižších rozsazích a s menšími kroky, měření byla provedena dvě první v rozmezí od 60 Hz do 80 Hz v krocích po 2 Hz, poté mezi hodnotami 68 Hz až 74 Hz v krocích po 1 Hz.

Nejvyšší rychlost byla zaznamenána při 72 Hz. Tuto frekvenci lze považovat za vlastní frekvenci akčního členu, a proto s touto frekvencí budou prováděny experimenty pro určení rychlostních profilů. S touto frekvencí, tj. 72 Hz, měly být provedeny i experimenty ochlazování zahřívané desky syntetizovaným proudem, při dalším měření však bylo zjištěno, že nalepovací sonda 55R47 je příliš pomalá a proto byla pro tyto experimenty použita frekvence 30 Hz. Výsledky měření jsou zaneseny v grafu a podrobnější výsledky přiloženy v příloze č. 3.

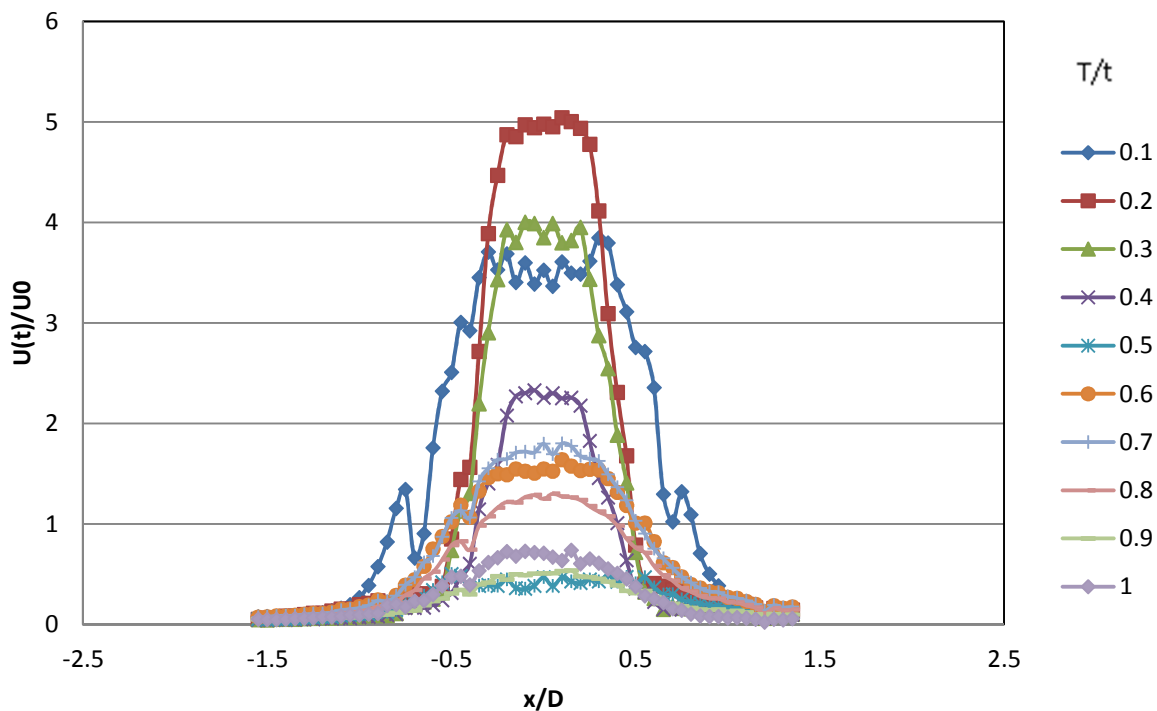


Graf 4.1 Frekvenční charakteristika

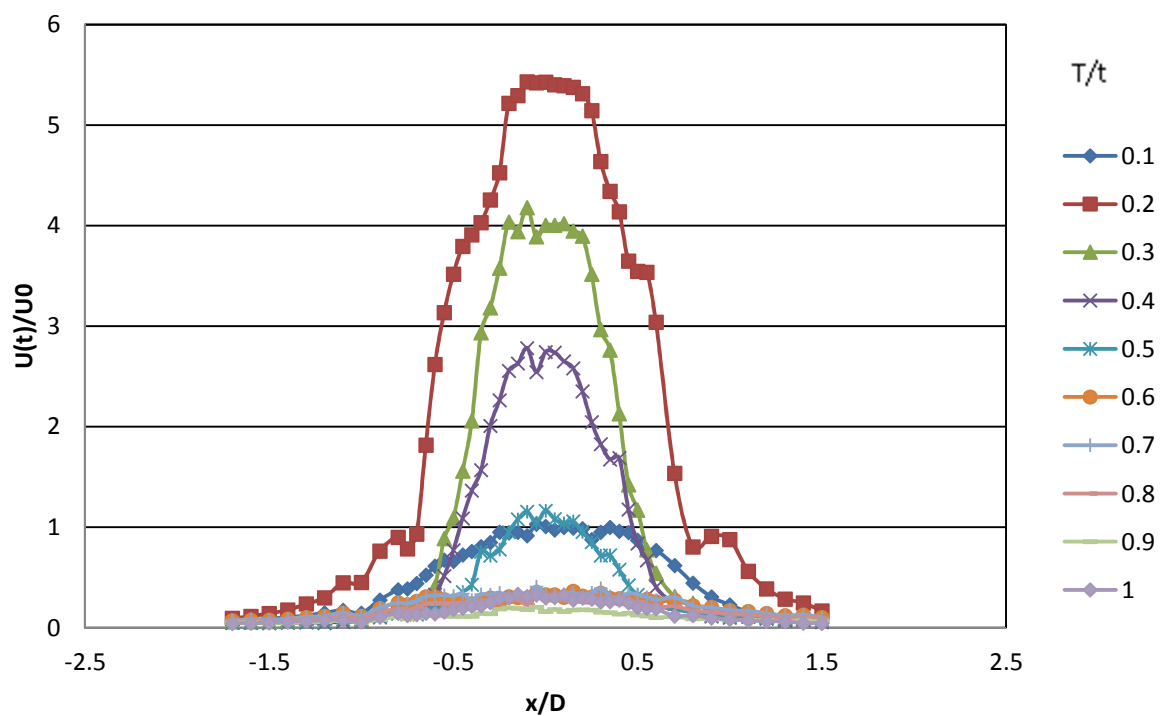
#### 4.2. Rychlostní profily v horizontální rovině $x, z$

Rychlostní profil v ose  $z$  byl změřen pro zjištění středu trysky a vycentrování traverzačního zařízení. Byl zjištěn bod s nejvyšší hodnotou průměrné rychlosti a v tomto bodě, se pokračovalo v měření v souřadnici  $x$ . Z měření provedené v těsné blízkosti trysky  $y/D = 0.2$  byla stanovena hodnota  $U_0 = 4,087233$  m/s.

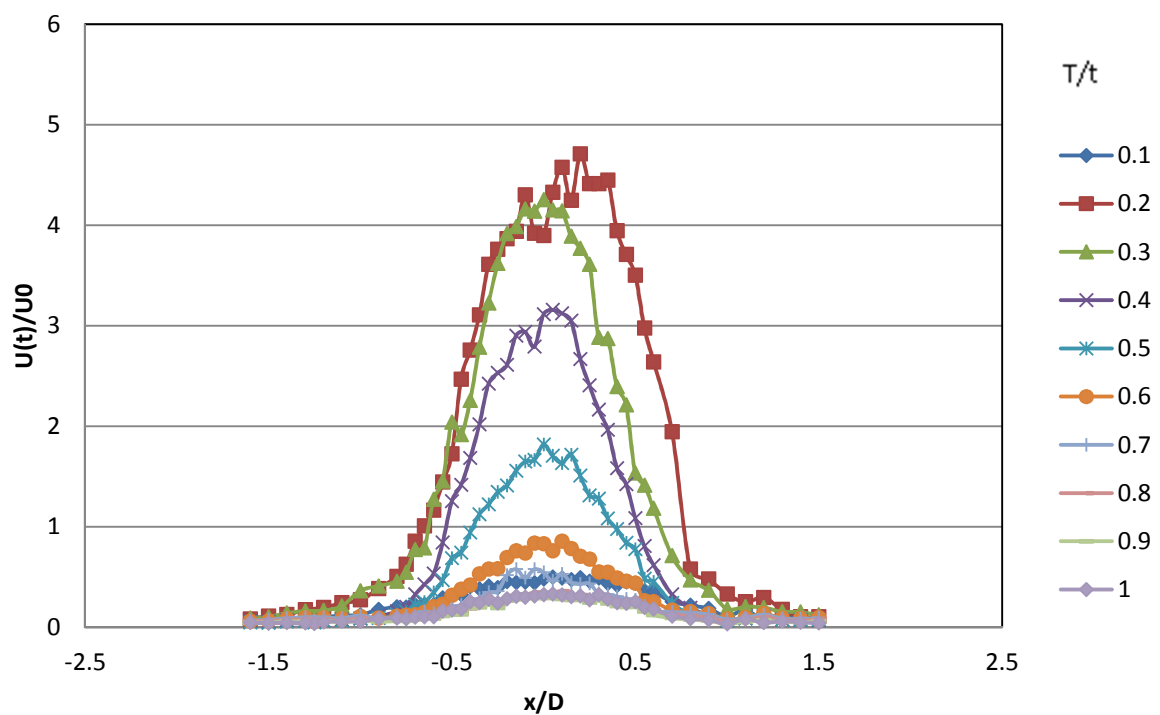
Rychlostní profily v souřadnici  $x$  byli měřeny ve vzdálenosti od trysky  $y/D = 0.2, 1, 2, 4$ . V grafech je zobrazen průběh proudění po jedné desetíně periody pracovního cyklu, začátek pracovního cyklu byl brán jako náběžná hrana TTL signálu. Souřadnice  $x/D = 0$  je střed trysky, měření je provedeno napříč deskou v ose trysky. V grafu 4.7 lze vidět v druhé polovině periody nasávání vzduchu. Hodnoty jsou kladné kvůli neschopnosti sondy měřit záporné hodnoty. V grafu 4.8 ve vzdálenosti  $y/D = 1$  má již nelze pozorovat fázi sání vzduchu do akčního členu.



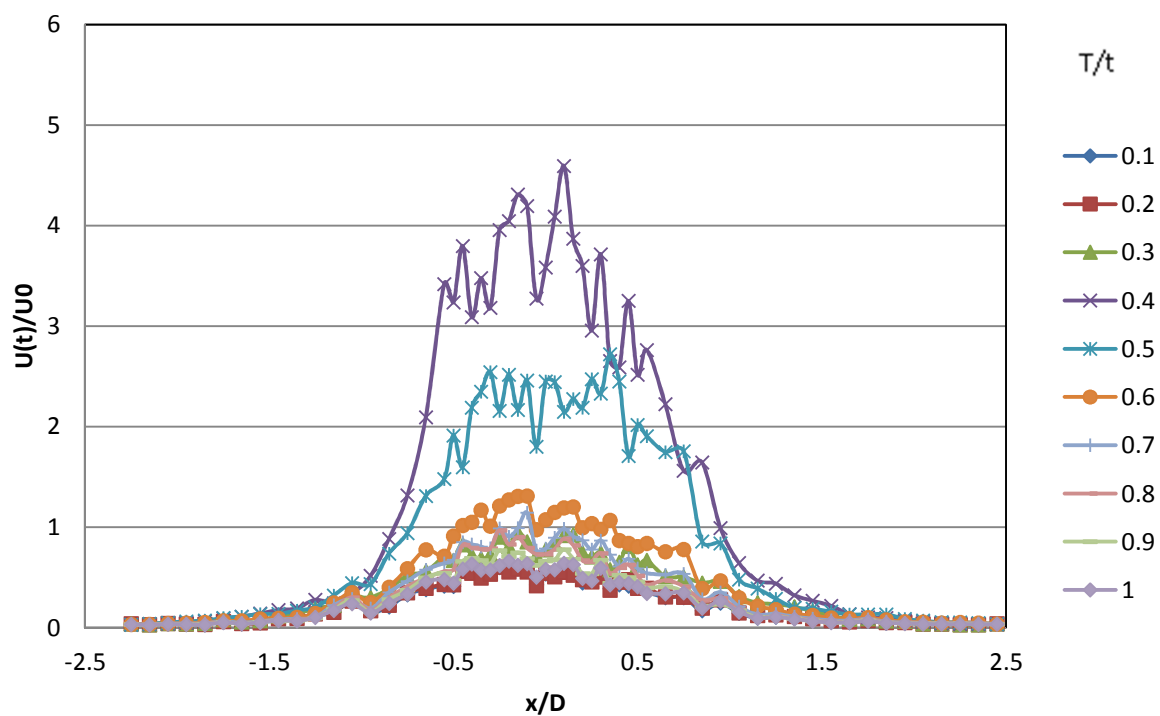
Graf 4.2 Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 0,2$



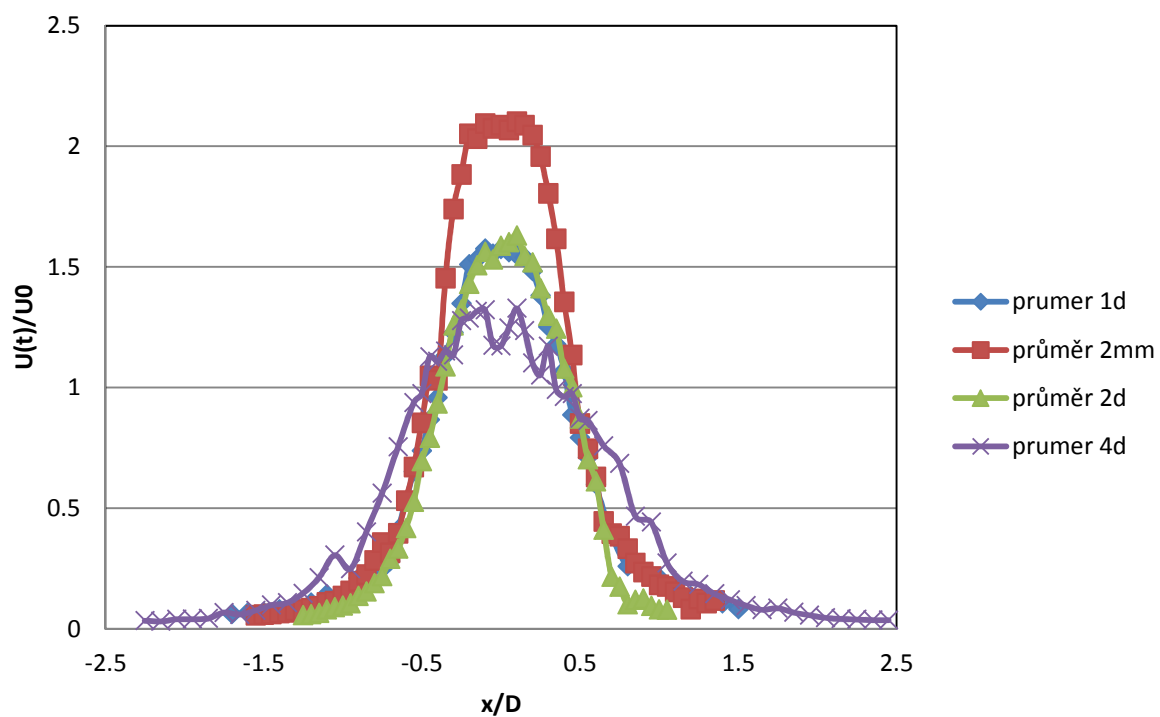
Graf 4.3 Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 1$



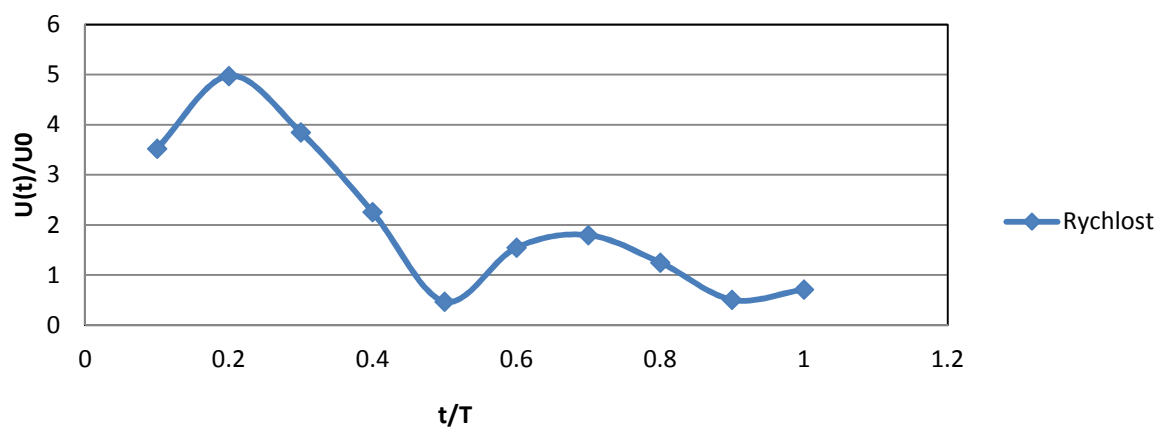
Graf 4.4 Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 2$



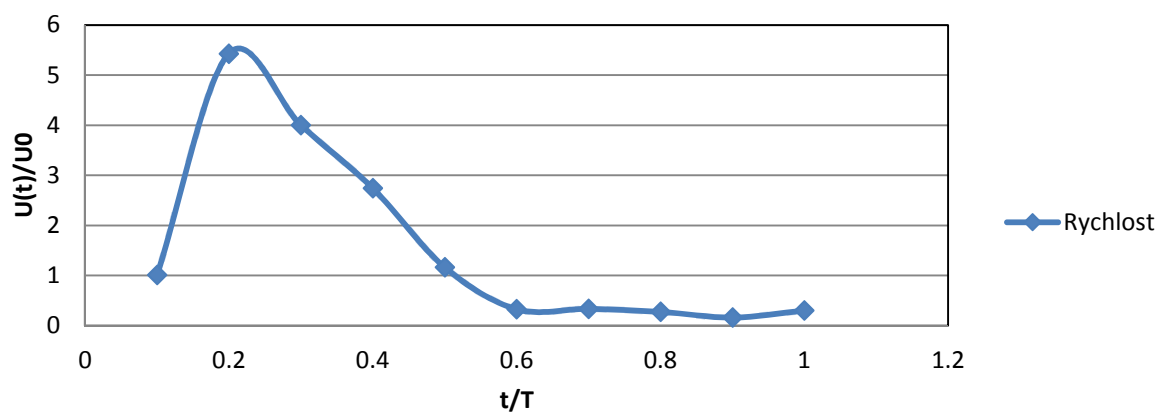
Graf 4.5 Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 4$



Graf 4.6 Souhrn rychlostních profilů, průměrná rychlost v celé periodě  $T$ .



Graf 4.7 Průběh rychlosti v ose trysky ve vzdálenosti  $y/D = 0,2$



Graf 4.8 Průběh rychlosti v ose trysky ve vzdálenosti  $y/D = 1$

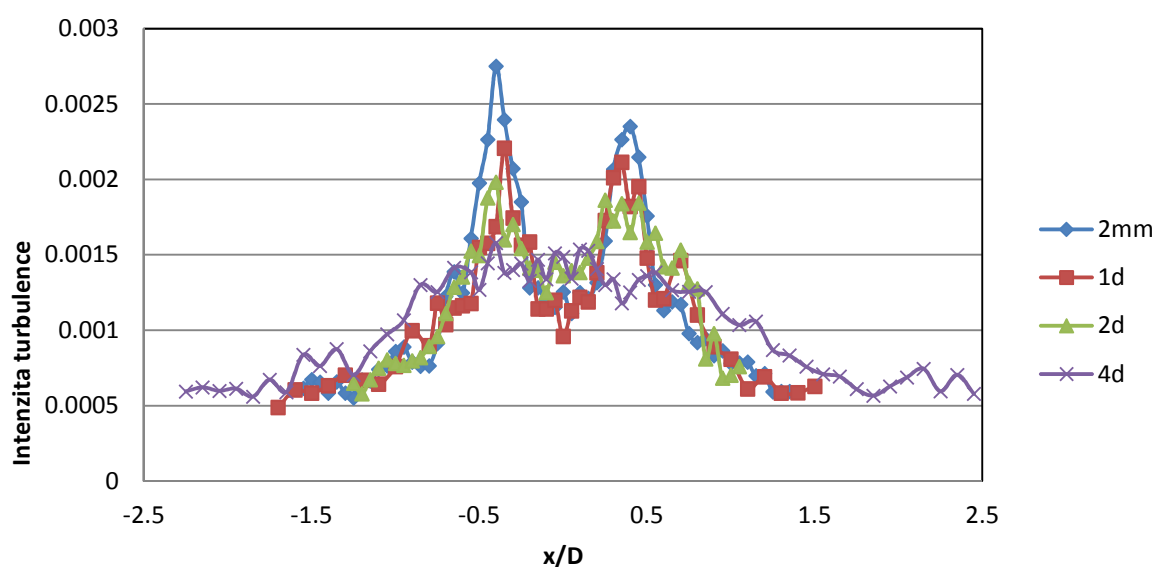


### 4.3. Intenzita turbulence

S přestupem tepla úzce souvisí i charakter proudění, při turbulentním proudění je přestup mnohem vyšší než u proudění stejné rychlosti s laminárním prouděním. Proto byla vypočtena i intenzita turbulence jako:

$$T_i = \frac{E_{rms}}{E_{mean}} \quad (34).$$

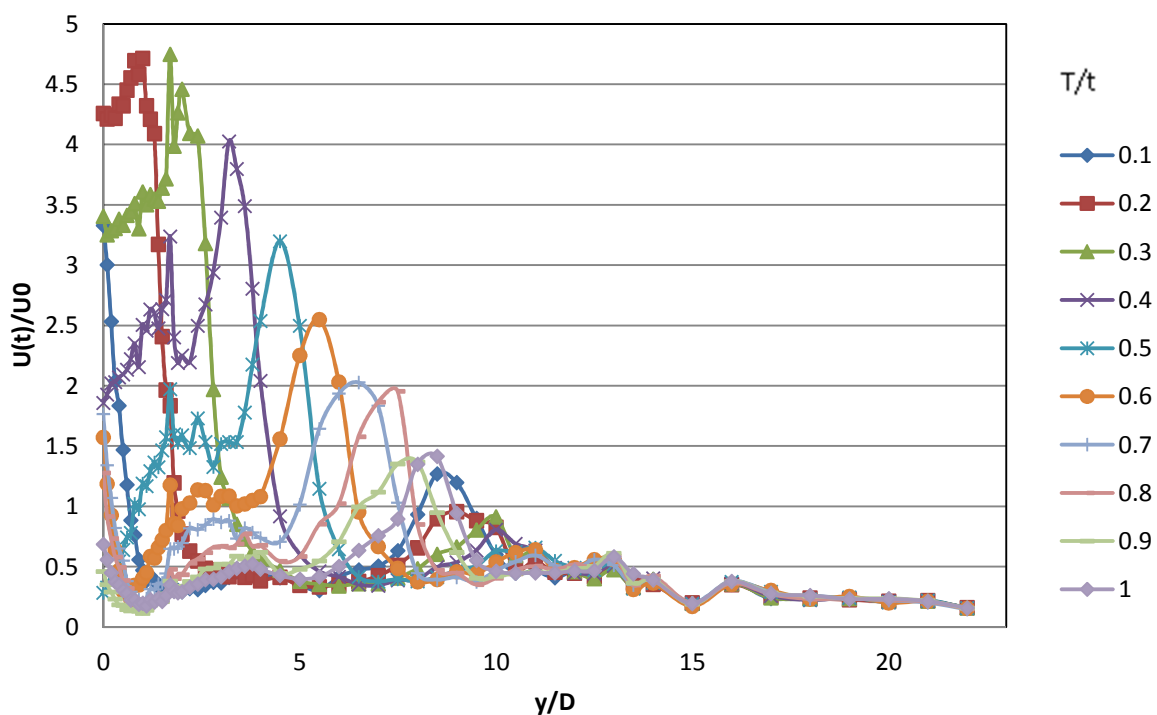
K výpočtu pro jednotlivé časové intervaly byl použit stejný program jako pro výpočet střední hodnoty k nahlédnutí v příloze 7. Místo funkce mean bylo použito funkce std pro výpočet střední směrodatné odchylky  $E_{rms}$ .



Graf 4.10 Intenzita turbulence

#### 4.4. Rychlostní profily v ose trysky y

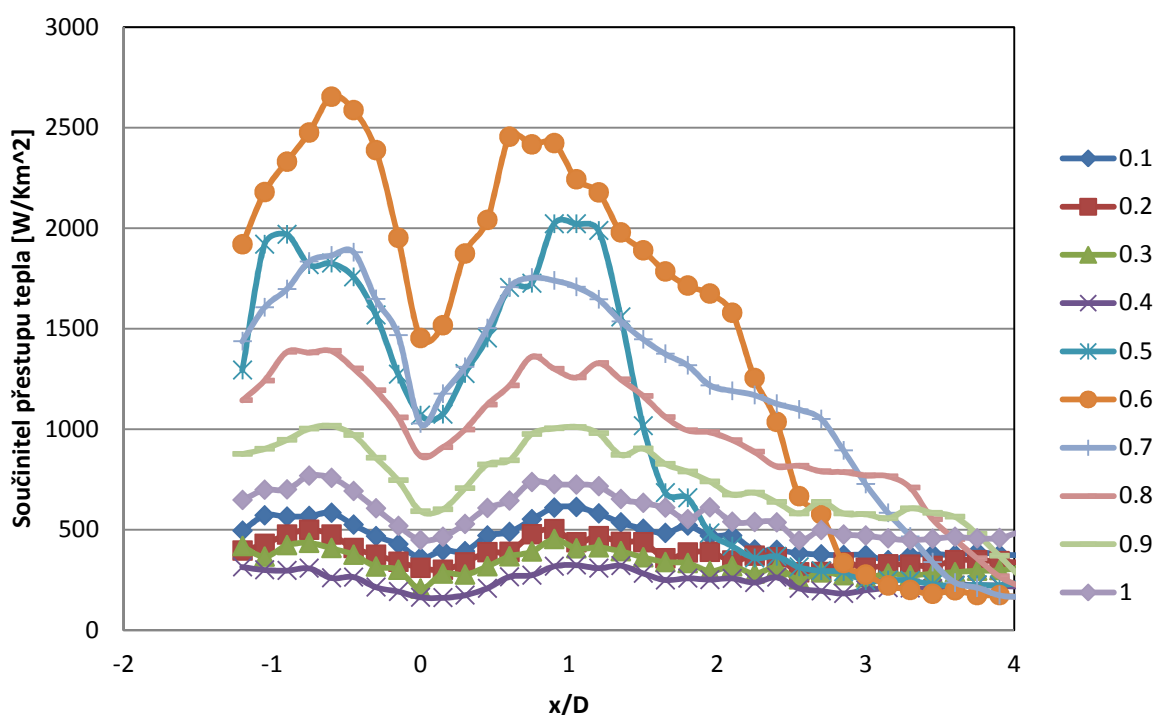
Na grafu lze vidět, že v blízkosti trysky se během jedné periody značně mění rychlost proudění vzduchu, s vzrůstající vzdáleností od trysky se tyto změny postupně zmenšují. Ve vzdálenosti cca 125 mm od trysky je již změna rychlosti v průběhu periody minimální až nulová a proto má toto proudění již podobný charakter jako kontinuální výtok z trysky.



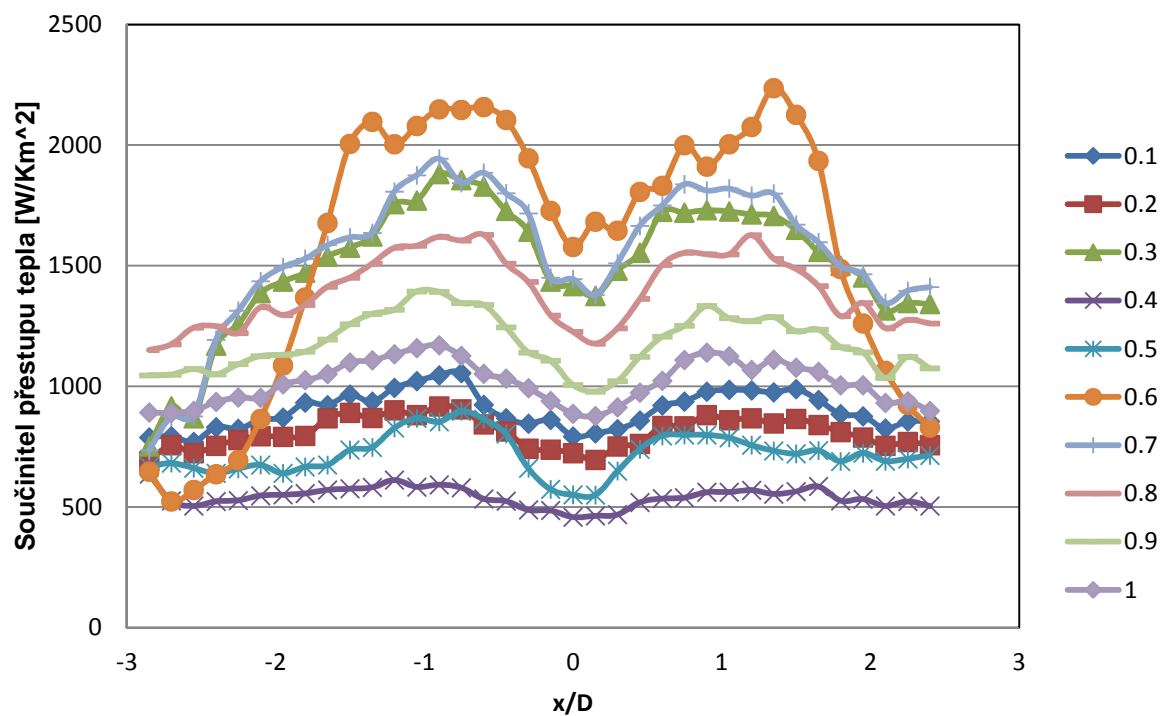
Graf 4.11 Rychlostní profil v ose trysky

#### 4.5. Součinitel přestupu tepla

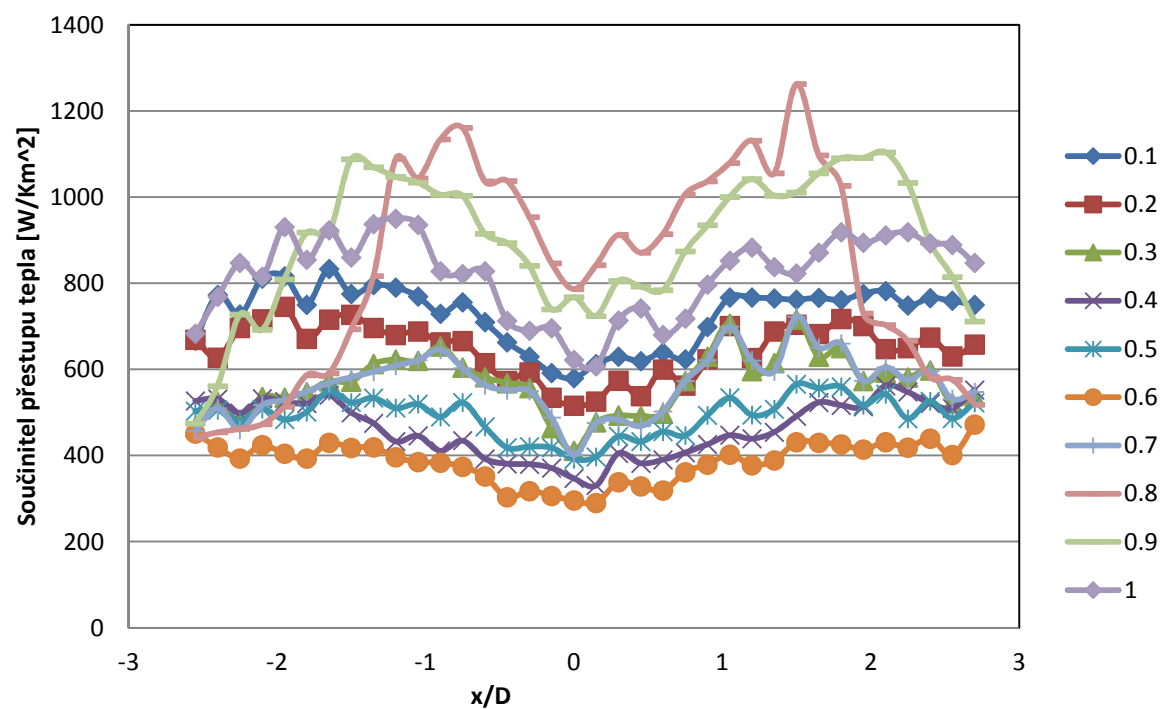
Měření součinitele přestupu tepla bylo provedeno ve čtyřech vzdálenostech od trysky  $y/D = 3.5, 5, 10, 20$ . V blízkosti trysky lze pozorovat dopad vírových prstenců na povrch desky a tím i výrazný přenos tepla v těchto místech, tvar grafu HTC (součinitel přestupu tepla ang. heat transfer coefficient) koresponduje s tvarem grafu intenzity turbulence. Se zvětšující vzdáleností se zmenšuje výrazný rozdíl mezi středem vírového prstence a samotným prstencem. Ve vzdálenosti  $y/D = 20$  již není zřejmý ani rozdíl HTC v čase periody, rychlost a charakter proudění je již v čase konstantní. V posledním grafu jsou uvedeny časově středované hodnoty součinitele přestupu tepla pro jednotlivé naměřené hodnoty. Lze vidět, že v blízkosti trysky je menší přenos tepla než ve vzdálenosti  $y/D = 5$ , nejspíše to je způsobeno nerozvinutím vírového prstence a jeho předčasný zánik, jeho zánik zapříčiňuje, že okolní vzduch nemá čas být stržen sebou a zvýšit tím hmotový tok.



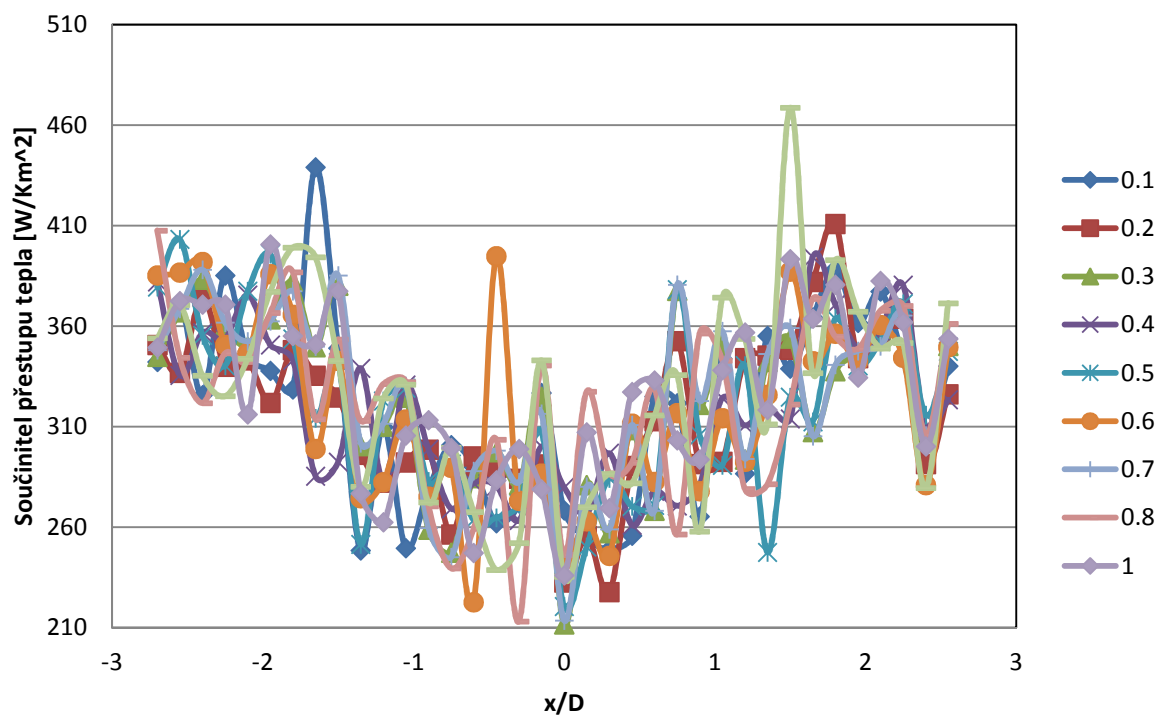
Graf 4.12 Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D = 3,5$  od trysky



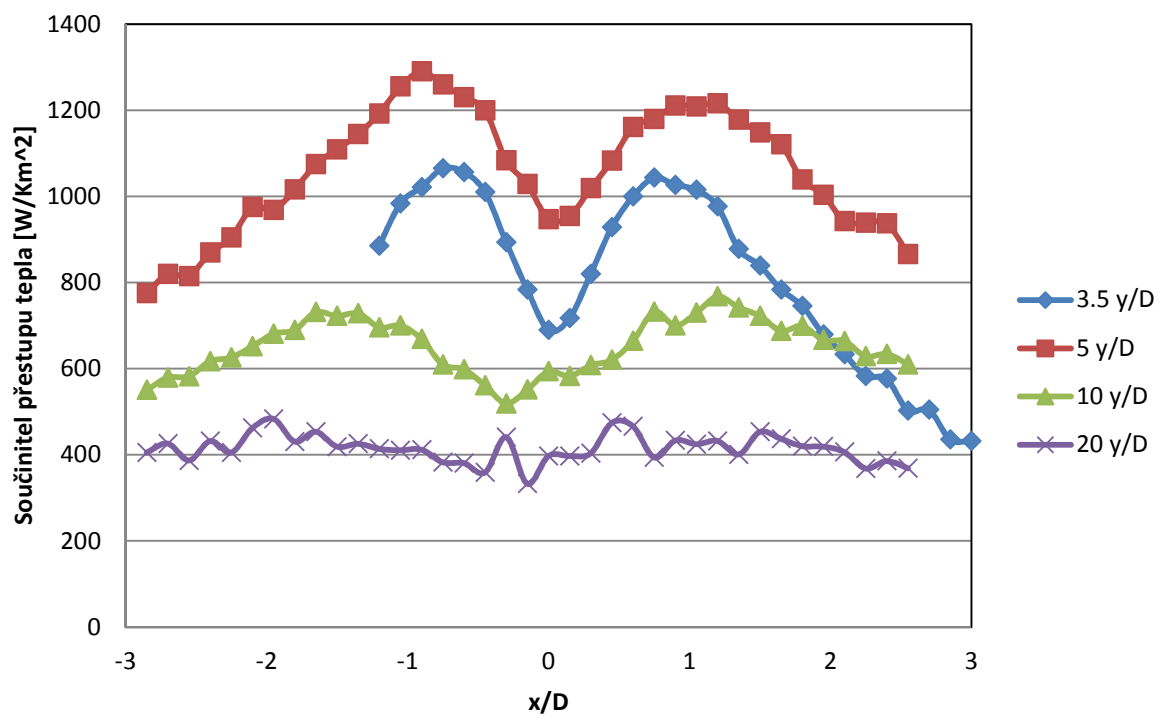
Graf 4.13 Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D = 5$  od trysky



Graf 4.14 Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D = 10$  od trysky



Graf 4.15. Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D = 20$  od trysky



Graf 4.16 Průměrná hodnota součinitele přestupu tepla

## 5. ZÁVĚR

V práci byly zkoumány vlastnosti syntetizovaného proudu, kdy pracovním médiem byl vzduch. Během bakalářské práce bylo sestaveno experimentální zařízení pro změření vlastností SyJ pro přenos tepla přestupem. Byla zkoumána souvislost charakteru proudění k termodynamickým vlastnostem. Níže jsou shrnuty poznatky získané během práce na základě změřených a zpracovaných dat.

### Konstrukce zařízení

Zařízení bylo složeno z akčního členu syntetizovaného proudu uchyceného v traverzačním zařízení a rovinné hliníkové desky. Na desce byla přilepena sonda Dantec 55R47, pomocí které byl změřen součinitel přestupu tepla. Akční člen byl napájen sinusovým signálem o frekvenci 30 Hz a konstantním výkonu  $P = 1,6 \text{ W}$ .

Pro získání rychlostních profilů bylo použito drátkové sondy Dantec 55P11 a akční člen byl poháněn sinusovým signálem o frekvenci 72 Hz a výkonu 1,14 W.

### Výsledky experimentů

Měření rychlostních profilů nám dalo jasnou představu o průběhu syntetizovaných proudů v čase a prostoru. Frekvenční charakteristika nám objasnila i závislost frekvence buzení na střední rychlosti proudění.

Experimentálně byla určena vlastní frekvence akčního členu  $f = 72 \text{ Hz}$ .

Z naměřených rychlostních profilů lze pozorovat rozšíření vírového prstence ze zvyšující se vzdáleností  $y$  od ústí trysky. Z grafu rychlostního profilu ve vzdálenosti  $y/D = 0,2$  od trysky lze také vypočítat fázi sání v druhé polovině periody pracovního cyklu akčního členu.

Se zvyšující se vzdáleností  $y$  od trysky lze pozorovat postupné ubývání rozdílů mezi sáním a výfukem a pozvolné snižování rychlosti. Ve vzdálenosti  $y/D = 12,5$  již skoro nelze pozorovat změny rychlosti proudění v průběhu periody pracovního cyklu akčního členu. V tomto místě se začíná podobat kontinuálnímu výtoku z trysky.

Při měření součinitele přestupu tepla zjištěna souvislost tvaru grafů HTC a intenzity turbulencí. Z toho vyplývá, že turbulentní charakter proudění výrazně přispívá k přenosu tepla z desky. Bylo také zjištěno, že průměrná hodnota HTC je větší ve vzdálenosti  $y/D = 5$  než ve vzdálenosti  $y/D = 3,5$ . Ve vzdálenosti  $y/D = 10$  je již zase menší. To je zapříčiněno nedostatečným rozvinutím vírového prstence a nedostatek prostoru pro strhnutí okolního vzduchu. Úbytek HTC ve vzdálenosti  $y/D = 10$  je způsoben postupným zpomalováním proudění se zvětšující vzdáleností od ústí trysky. Ve vzdálenosti  $y/D = 20$  je HTC téměř konstantní po celé měřené délce, proudění má již vlastnosti kontinuálního proudění.

Nesymetričnost grafů HTC tak i rychlostních profilů může být zapříčiněna nerovnoměrnostmi v otvoru akčního členu (závit a zbytky lepidla), nerovnoměrnostmi v grafech HTC jsou s největší pravděpodobností způsobeny nerovností na desce, tato nerovnost se skládala ze silikonu, kterým byly přichyceny vodiče na jiné sondě, tento kus silikonu byl ve vzdálenosti cca 5 cm od aktivního měřicího elementu.

## **5.1 Doporučení a předpokládané směry dalšího výzkumu**

Při pokračování výzkumu na toto téma je vhodné najít ideální vzdálenost trysky  $y/D$  od ochlazovaného povrchu pro získání co největšího součinitele přestupu tepla. Pro zajištění konstantnějšího součinitele přestupu tepla synchronizovat více akčních členů s posunutou periodou pracovního cyklu. Nebo se pokusit experimentovat s obdélníkovým buzením s nestejně dlouhou fází sání a výfuku.

Syntetizované proudění by se díky dobrému přenosu tepla a možnosti miniaturizace, mohlo aplikovat při chlazení elektronických součástek, např. počítačových procesorů nebo termoelektrických článků.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

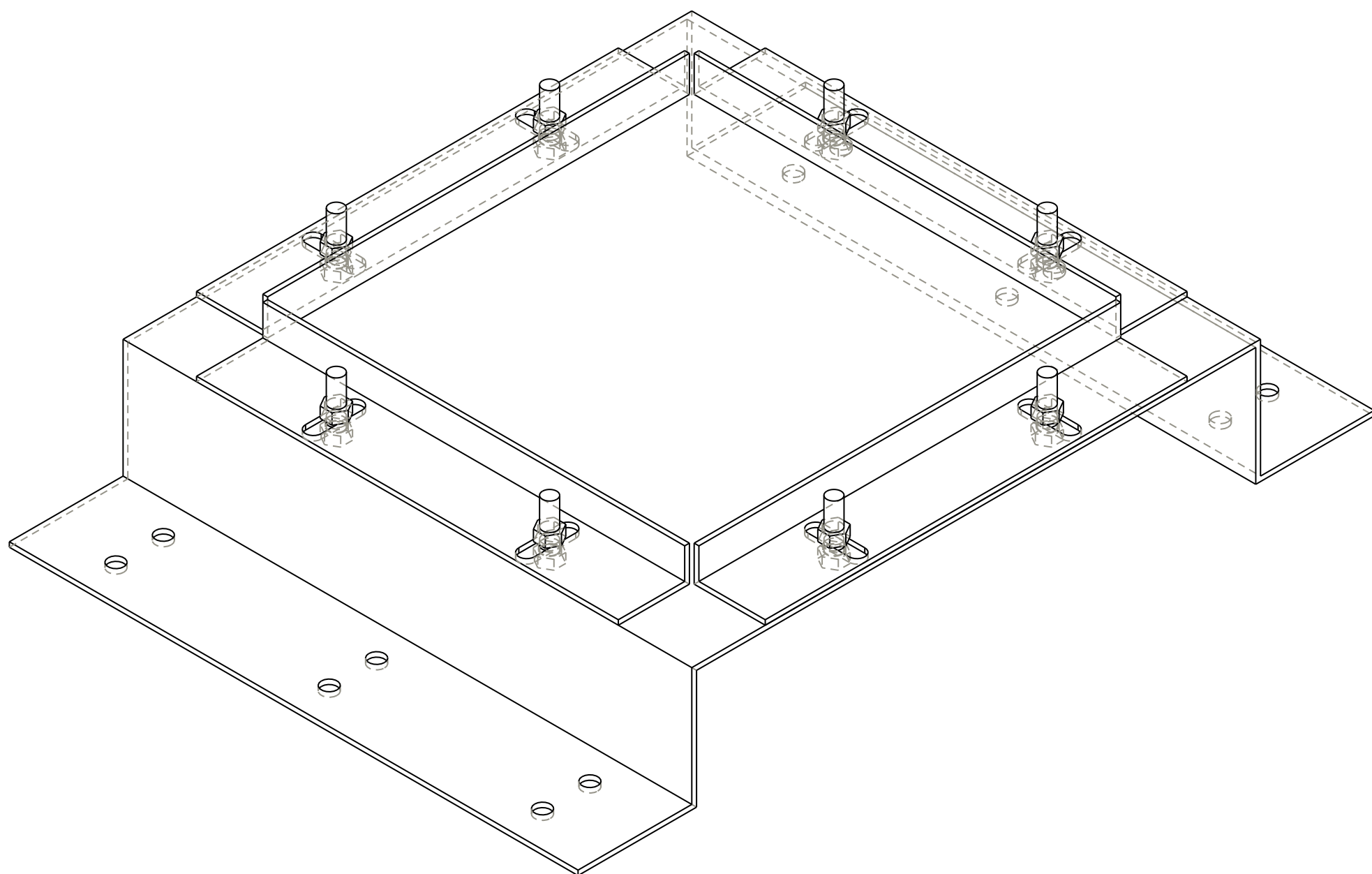
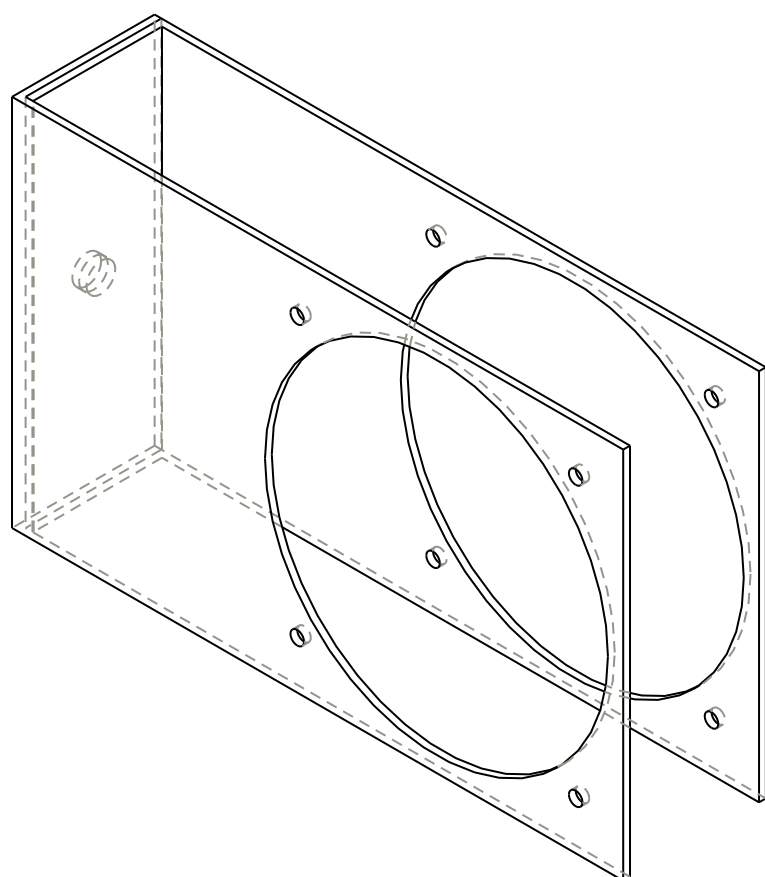
- [1] Barton L. Smith Barton L., Glezer A., The formation and evolution of synthetic jets , Physics of Fluids 10 2281 – 2297, 1998
- [2] Beasley D.E. and Figliola R.S., A generalized analysis of a local heat flux probe. J. Physics E, 1988, 21, 316-322
- [3] Bruun,H.H.: Hot wire anemometry, Oxford University, Press 1995
- [4] Clemens J.M. Lasance, Ronald M. Aarts: Synthetic Jet Cooling Part I: Overview of Heat Transfer and Acoustics
- [5] Dančová P., Vít T., Unger J., Studie proudění typu Synthetic jet, Technická univerzita Liberci 2006.
- [6] Dobrovský Bohumil, Kapesní strojnická příručka, Praha 1967 - Nakladatelství technické literatury.
- [7] George W.K., Beuther P.D. and Ahmad M., Polynomial calibration and quasi-linearization of hot-wires. Turbulence Research Laboratory Report, sunny Buffalo, US
- [8] Hans-Jochen Bartsch, Matematické vzorce, SNTL- Nakladatelství technické literatury, Praha 1983
- [9] James R.D., J.W. Jacobs, A. Glezer: A round turbulent jet produced by an oscillating diaphragm. Phys. Fluids, Vol. 8, No. 9 (1996), 2484–2495
- [10] Kundys J., Fabián P., Kozubková M., Měření žárovým anemometrem, VŠB fakulta strojní, 2004
- [11] M.A. Michejev, Základy sdílení tepla, Průmyslové vydavatelství 1952
- [12] Scholten J.W. and D.B. Murray, Measurement of Convective Heat Transfer Using Hot Film Sensors: Correctionfor Sensor Overheat
- [13] Scholten J.W. and D.B. Murray, Unsteady heat transfer and velocity of a cylinder in crossflow – Low freestream turbulence, Pergamon 1997, PII. S000017-9310(97)00250-0
- [14] Smith,B.L.,Glezer,A.: The formation and evolution of synthetic jets, Physics of Fluids 102281 – 2297, 1998
- [15] Swaminathan, M.K., Bacic,R., Rankin, G.W. and Sidhar,K.(1983). Improved calibration of hot-wire anemometers. J. Phys. E. SciInstr,16, 3335-338
- [16] Trávníček Z., Annular impinging jet with acoustic actuation - flow visualization and mass transfer on exposed walls, (Anulární impaktní proud s akustickým buzením - vizualizace proudového pole a přestup hmoty na obtékané stěně). Výzkumná zpráva IT CAS CR, Prague, Z-1310/01, 2001
- [17] Trávníček Z.: Příklady použití kouřové vizualizace proudění v experimentální mechanice tekutin. Vytápění větrání instalace, Vol. 11, No. 5 (2002) 230-233.
- [18] Trávníček,Z., Vogel,J.,Vít,T.,Maršík,F.: Flow field and mass transfer experimental and numerical studies of synthetic impinging jet, 4<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer,
- [19] Urbášek Jan, Termomechanika a Mechanikatekutin, Technická univerzita v Liberci 2005
- [20]<http://www.dantecdynamics.com/>
- [21]<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793008000959>
- [22]<http://www.taosystem.com/products/HWCVA-TN.pdf>
- [23][http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/Prenos\\_teplo\\_a\\_hmoty/ST\\_prenos\\_teplo\\_a\\_hmoty.ppd](http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/Prenos_teplo_a_hmoty/ST_prenos_teplo_a_hmoty.ppd)
- [24]<http://www-g.eng.cam.ac.uk/whittle/current-research/hph/hot-film/hot-film.html>



## SEZNAM PŘÍLOH

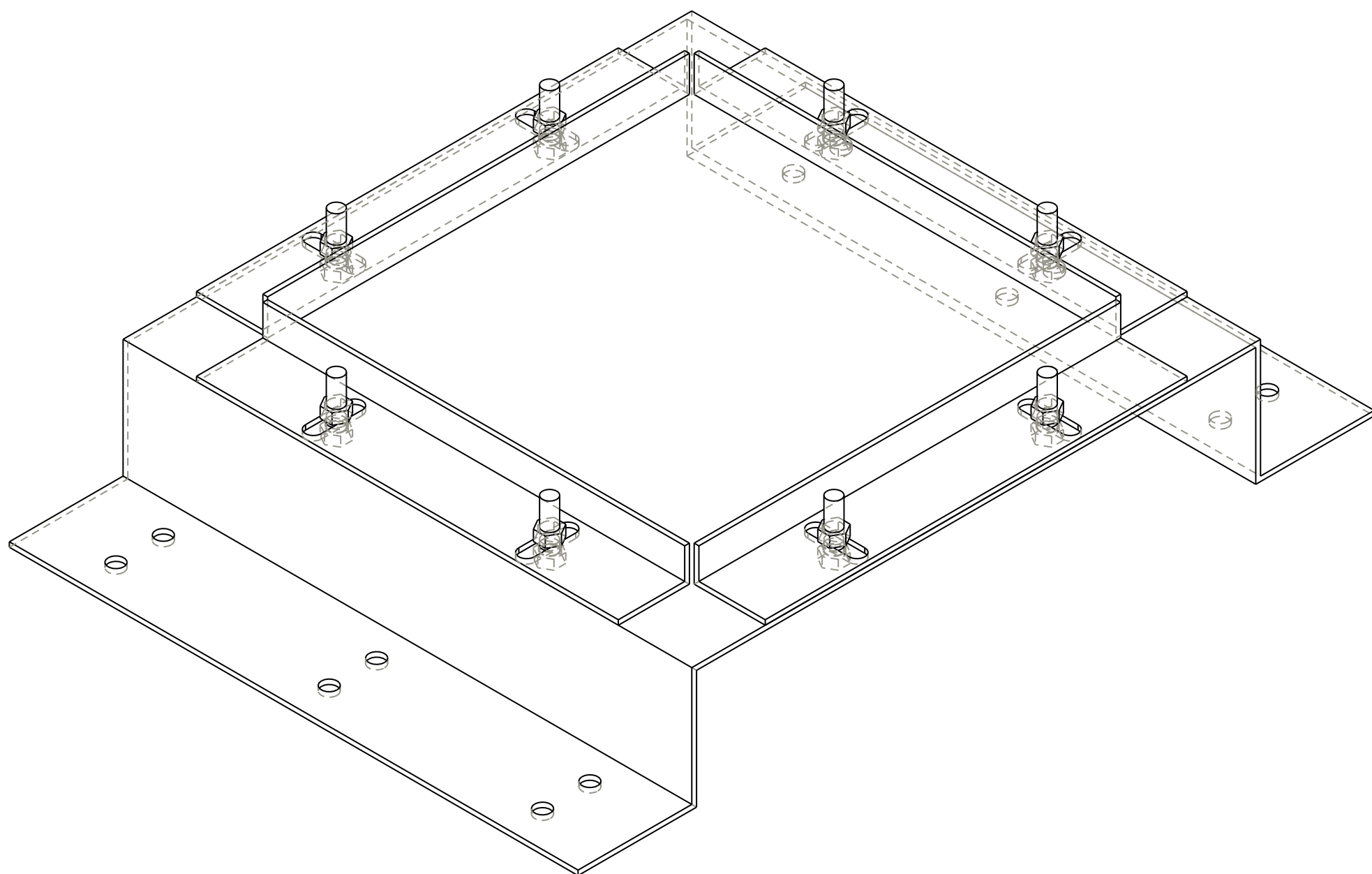
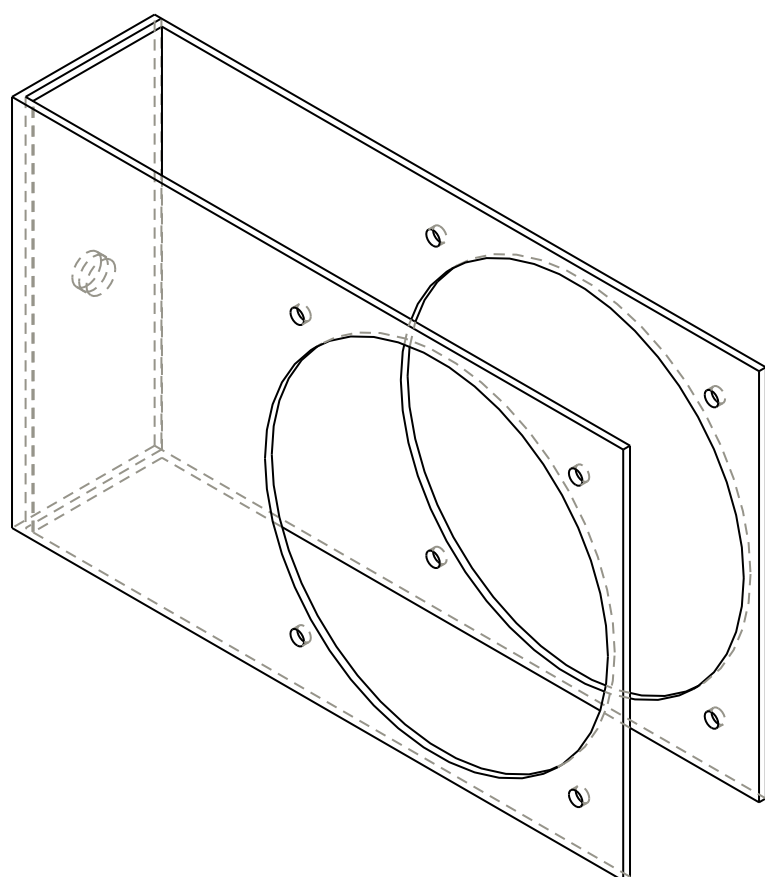
<b>Příloha 1</b>	Držák akčního členu
<b>Příloha 2</b>	Držák zahřívané desky
<b>Příloha 3</b>	Frekvenční charakteristika
<b>Příloha 4</b>	Rychlostní profily
<b>Příloha 5</b>	Intenzity turbulence
<b>Příloha 6</b>	Součinitel přestupu tepla
<b>Příloha 7</b>	Procedura na zpracování výsledků v sw MatLab

## **Příloha 1** Držák akčního členu



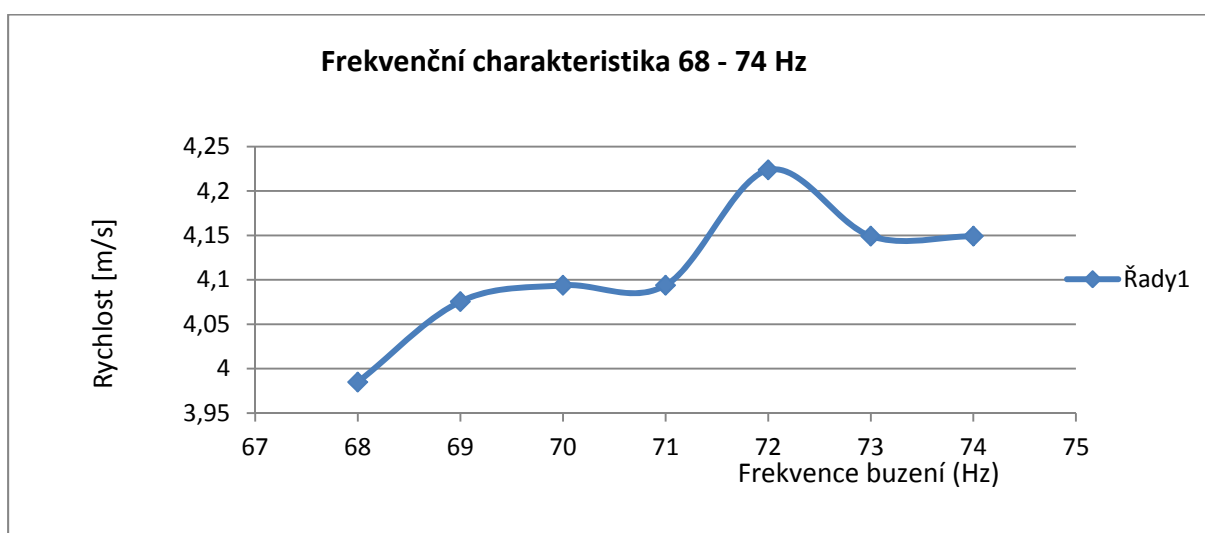
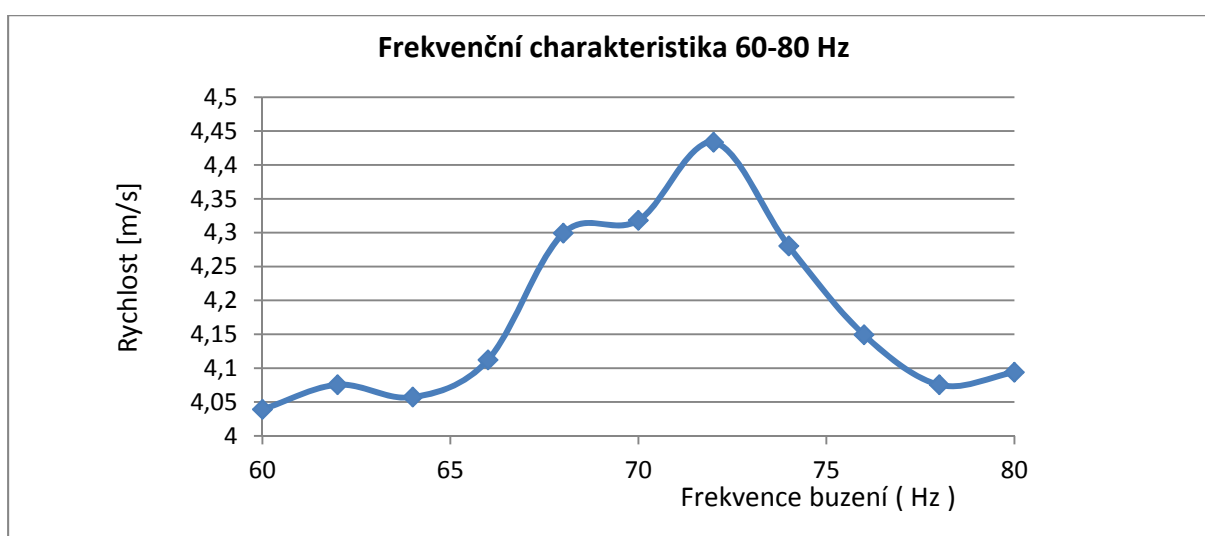
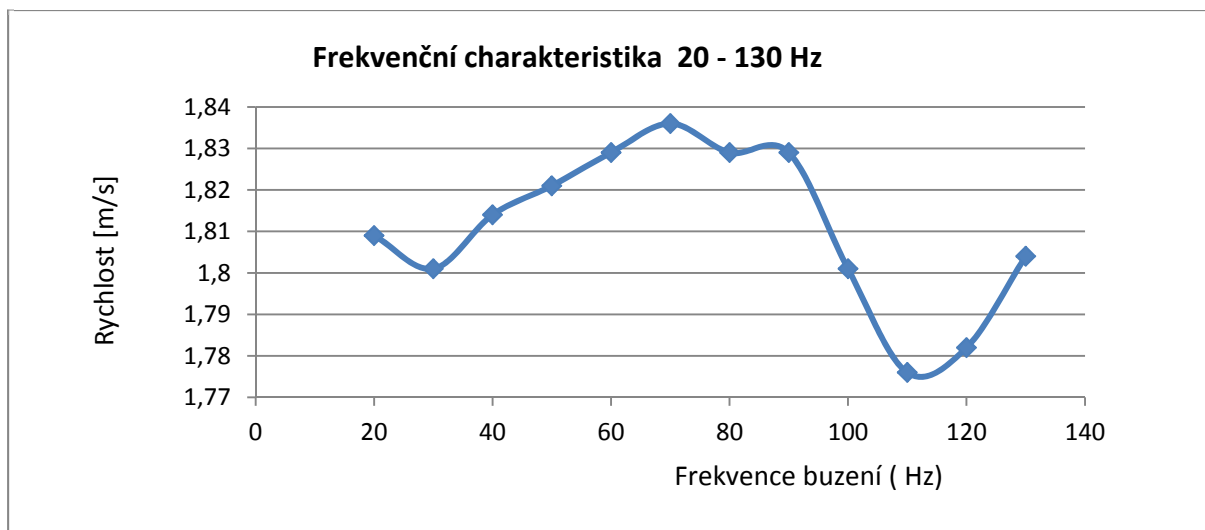
SCALE 0.025

## **Příloha 2** Držák zahřívané desky



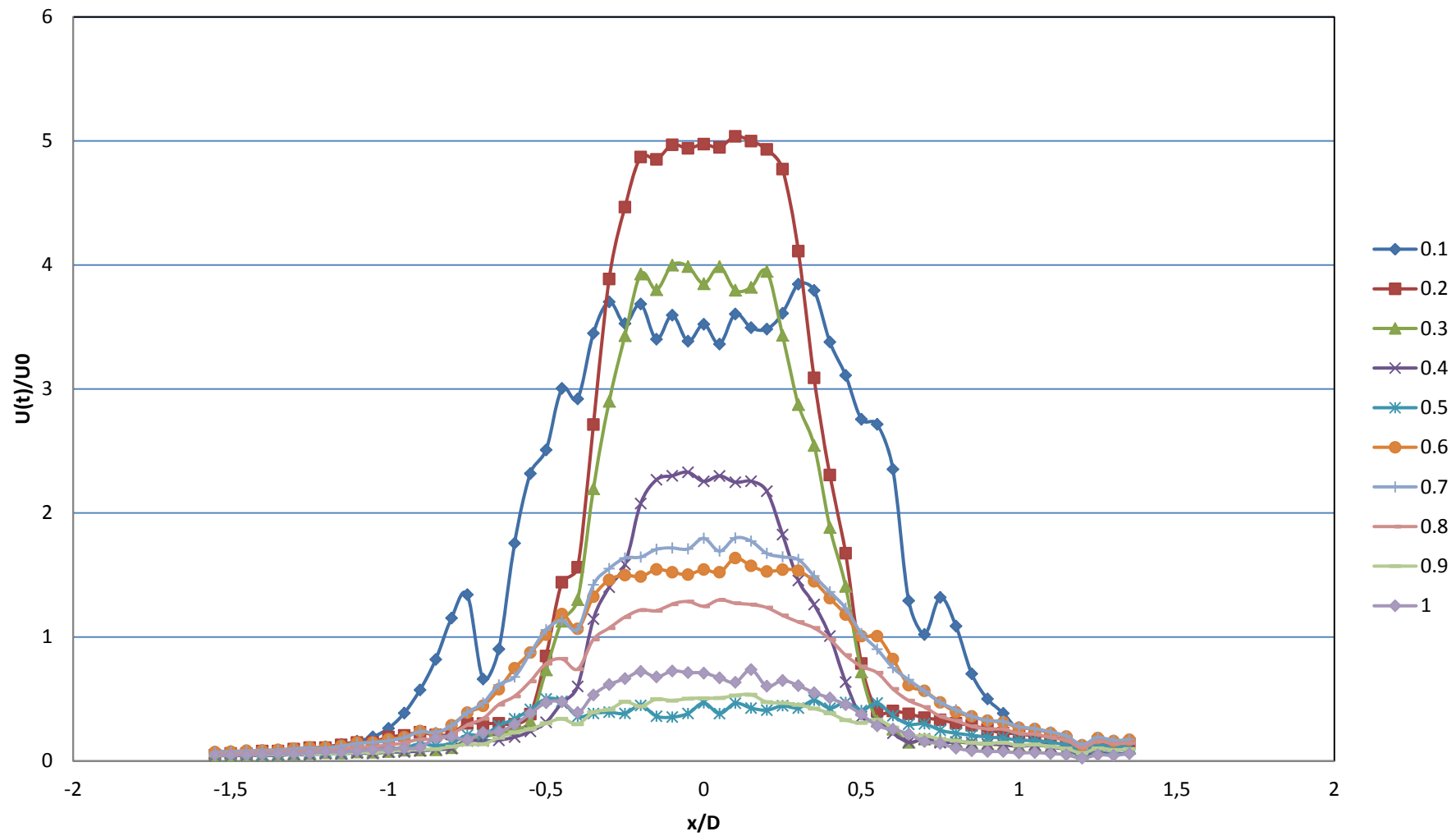
SCALE 0.025

### **Příloha 3** Frekvenční charakteristika

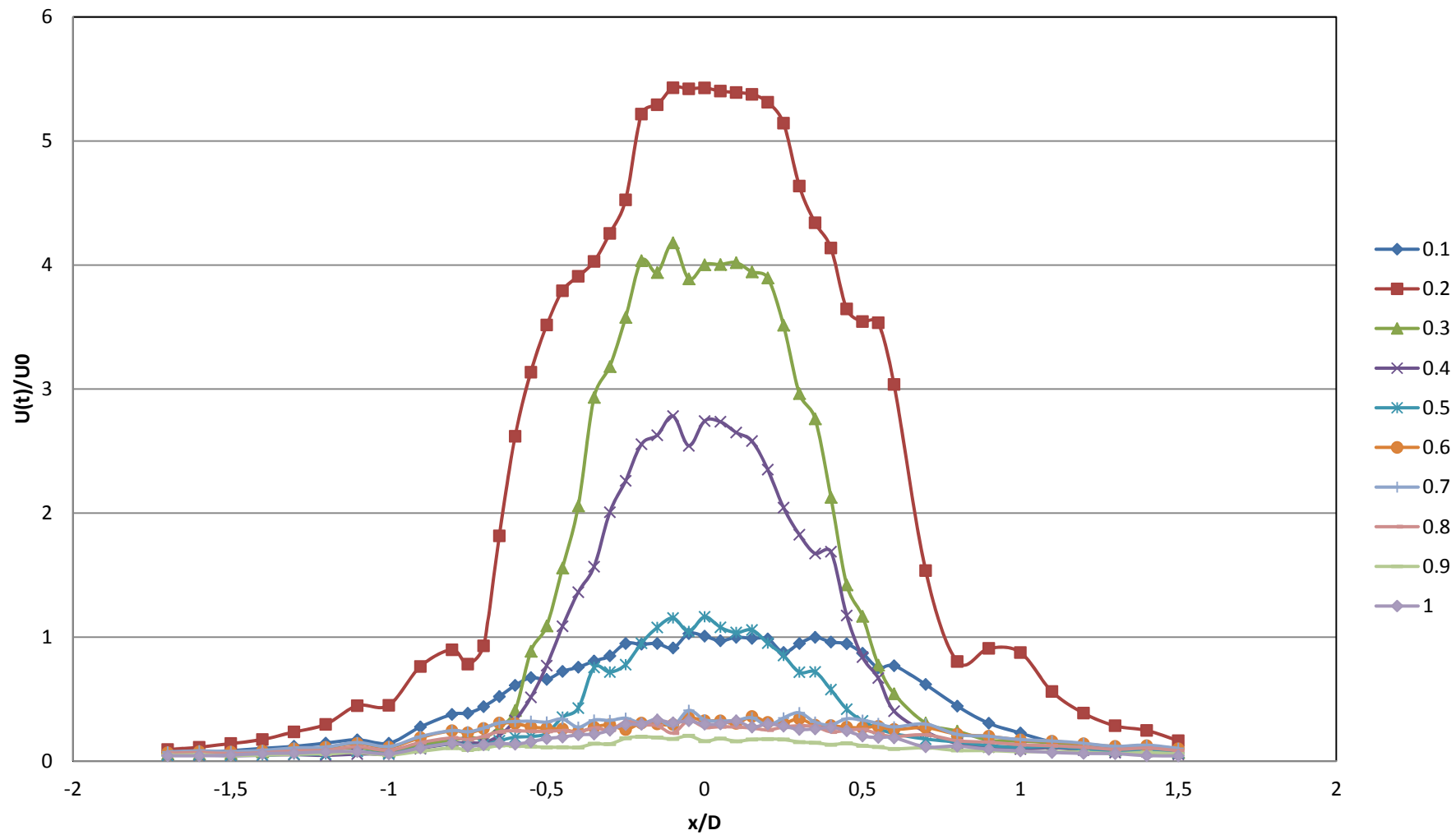


## **Příloha 4** Rychlostní profily

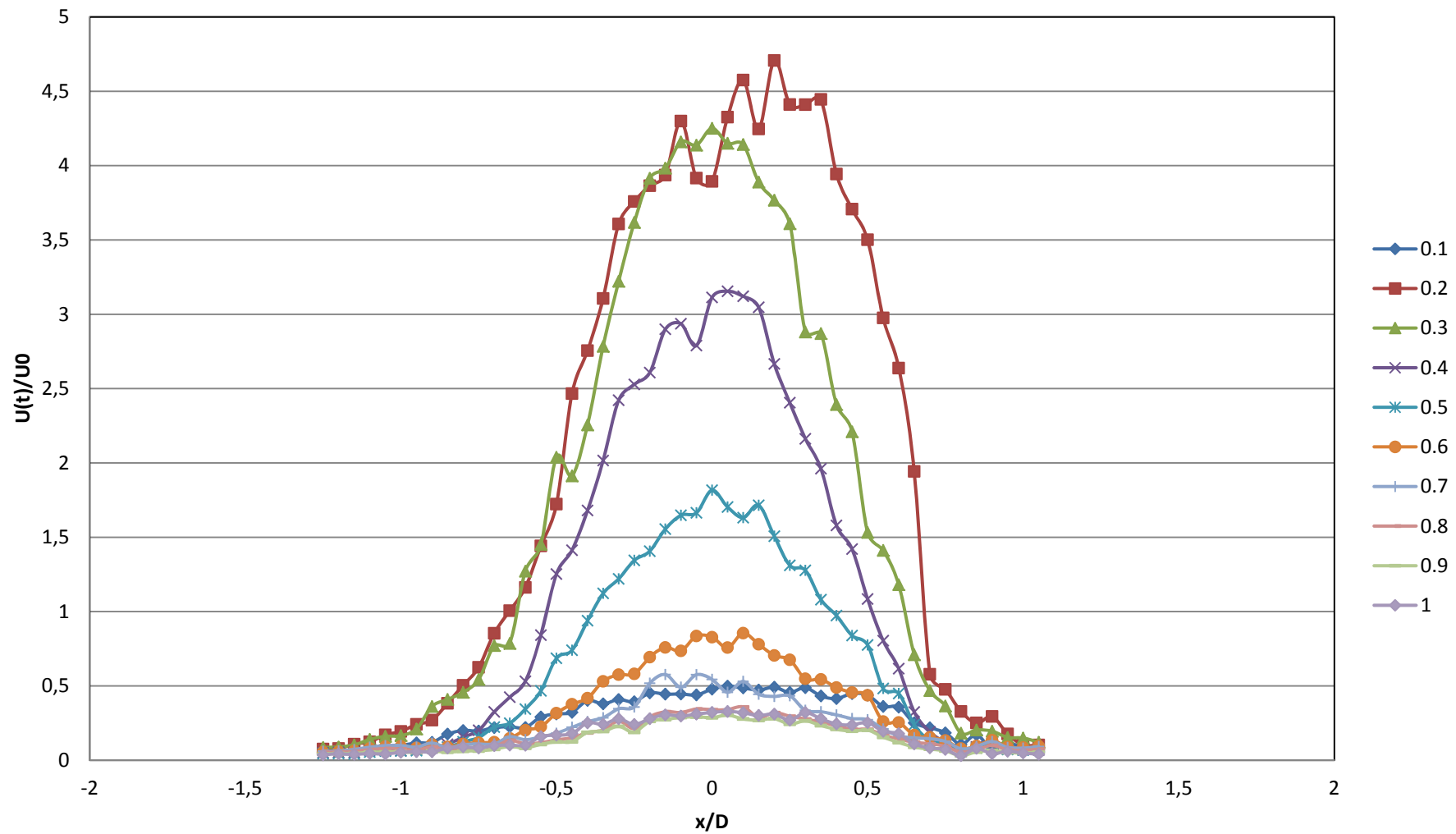




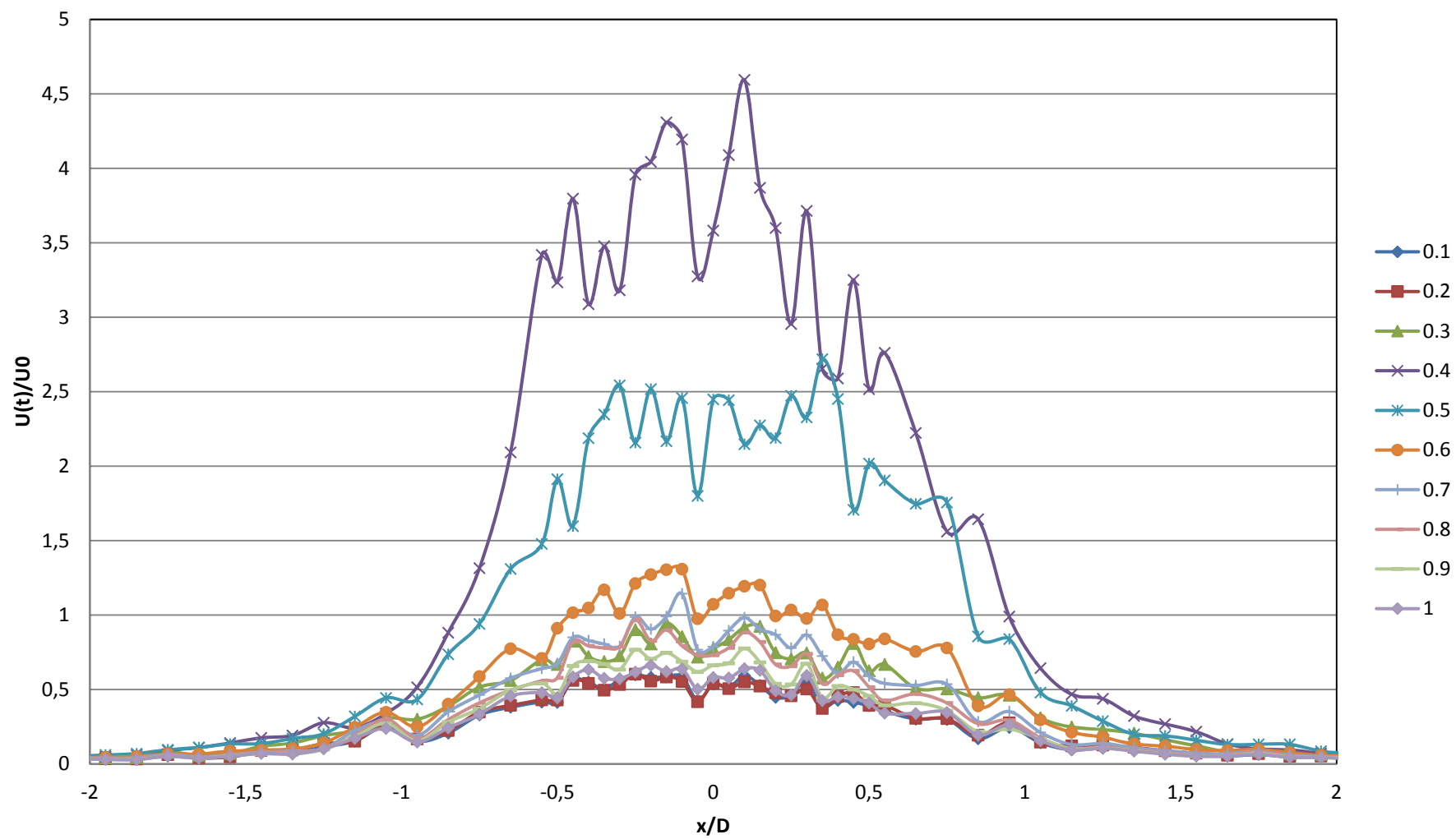
Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 0,2$  od trysky



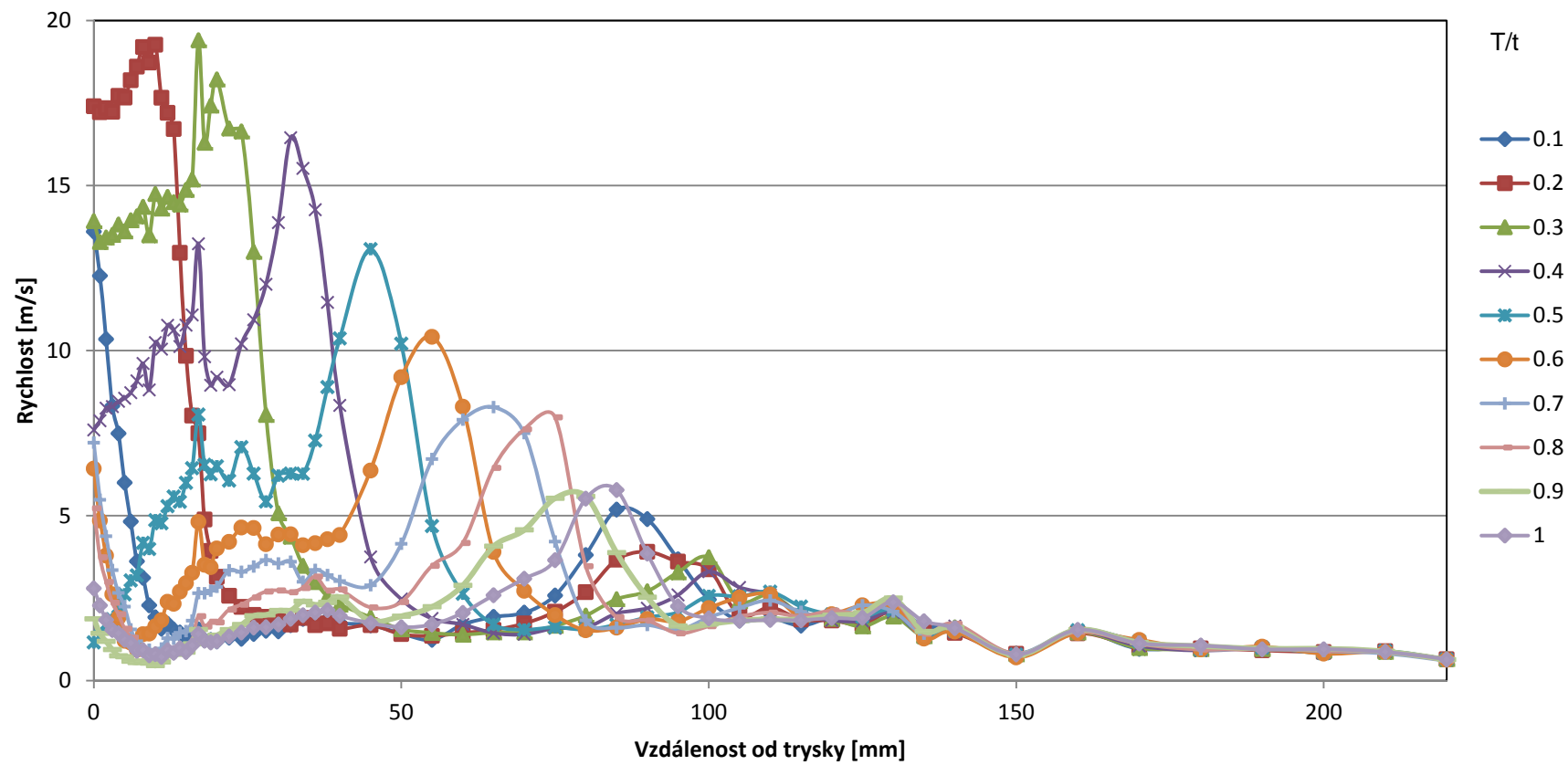
Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 1$  od trysky



Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 2$  od trysky

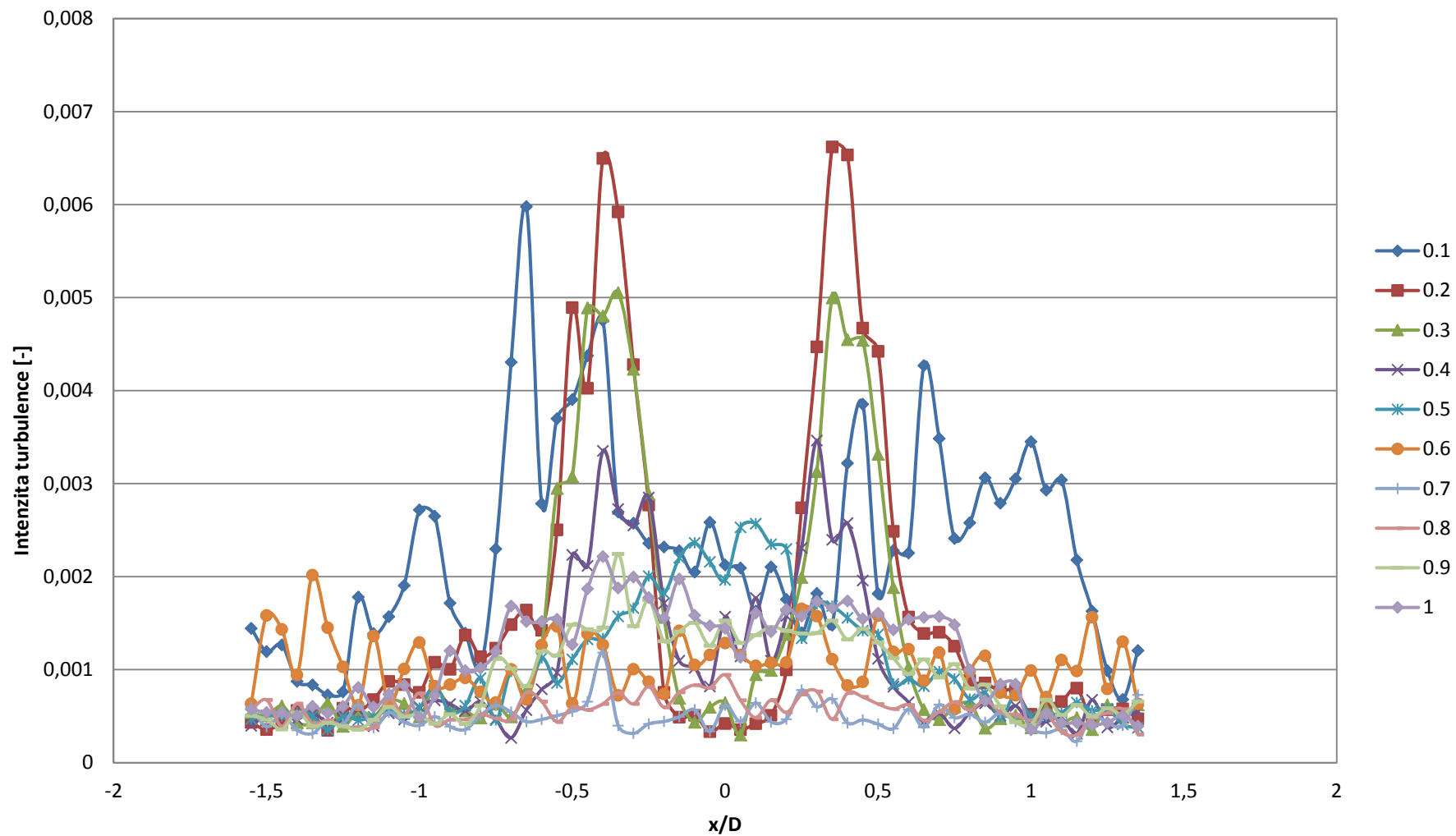


Rychlostní profil ve vzdálenosti  $y/D = 4$  od trysky

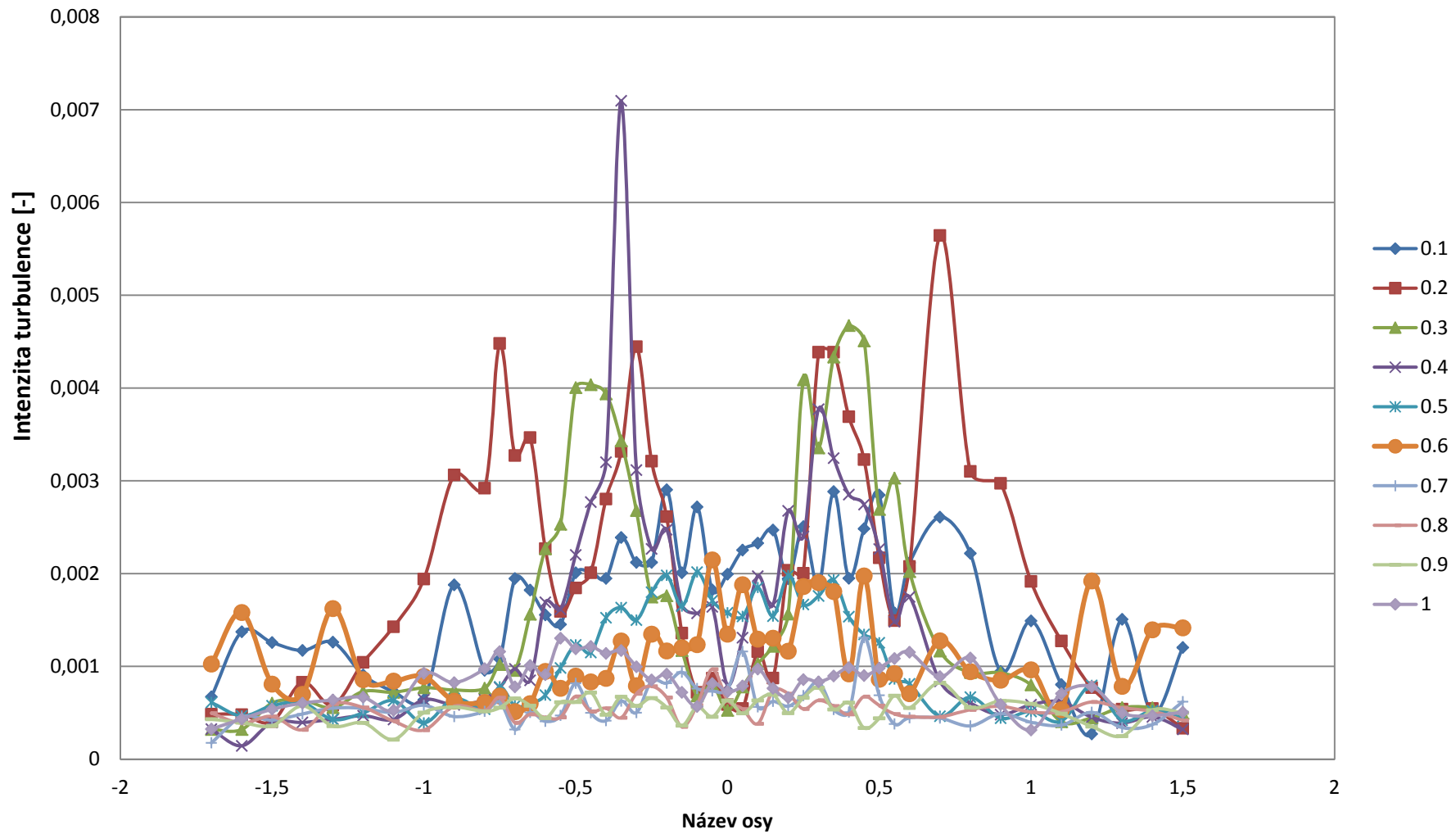


Rychlostní profil v ose trysky

## **Příloha 5** Intenzity turbulence

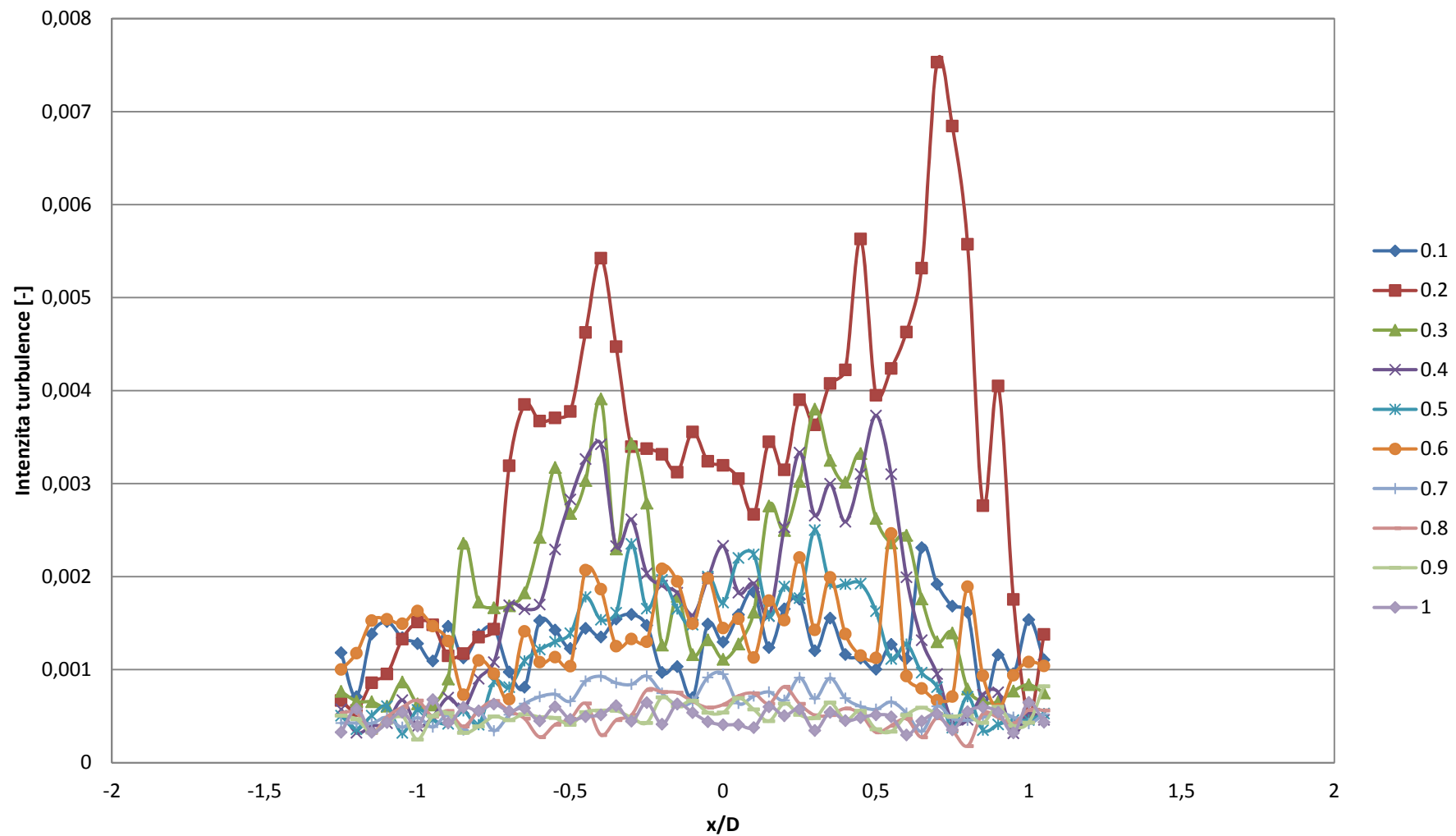


Intenzita turbulencí ve vzdálenosti  $y/D = 0,2$  od ústí trysky

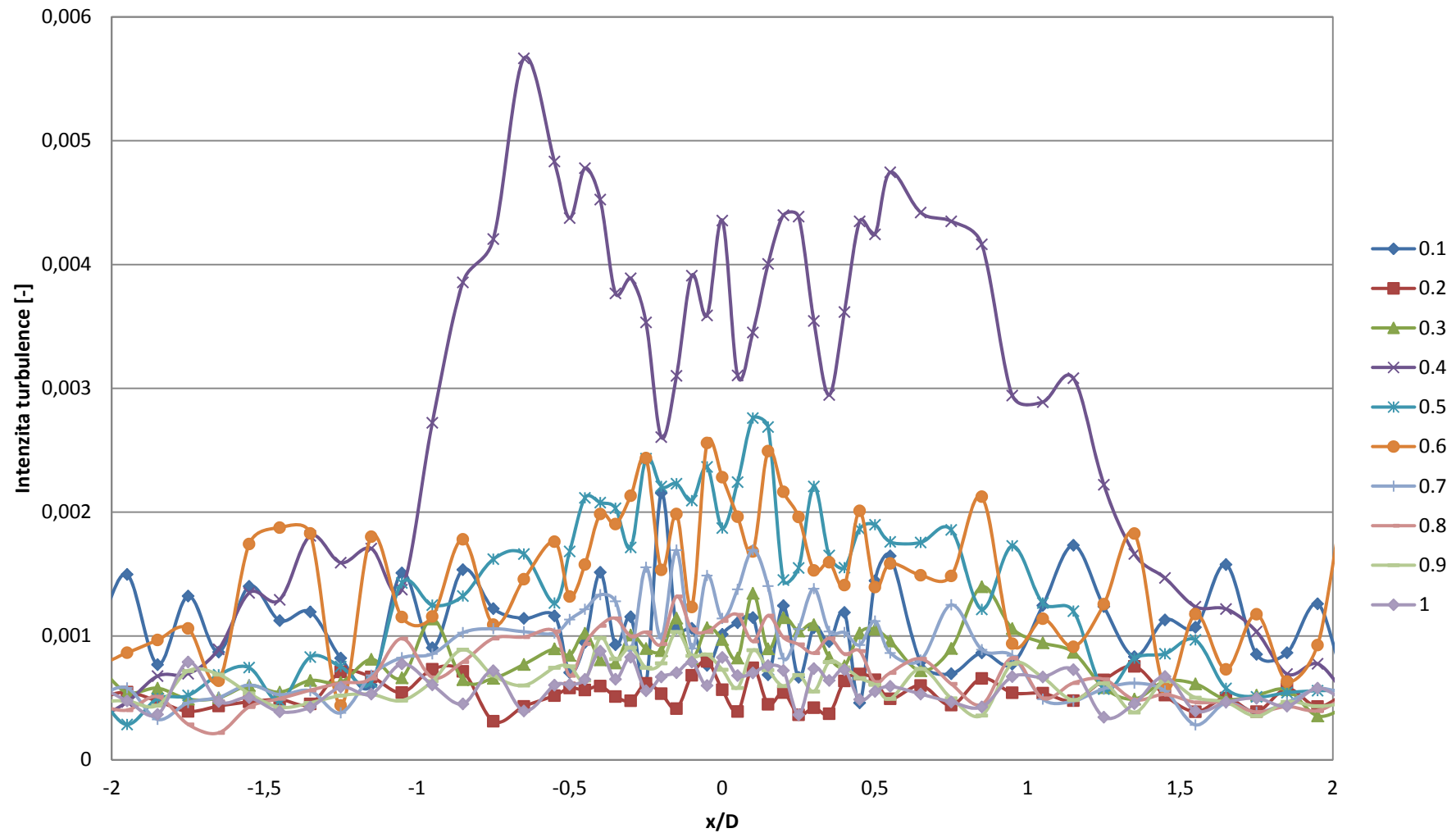


Intenzita turbulencí ve vzdálenosti  $y/D = 1$  od ústí trysky





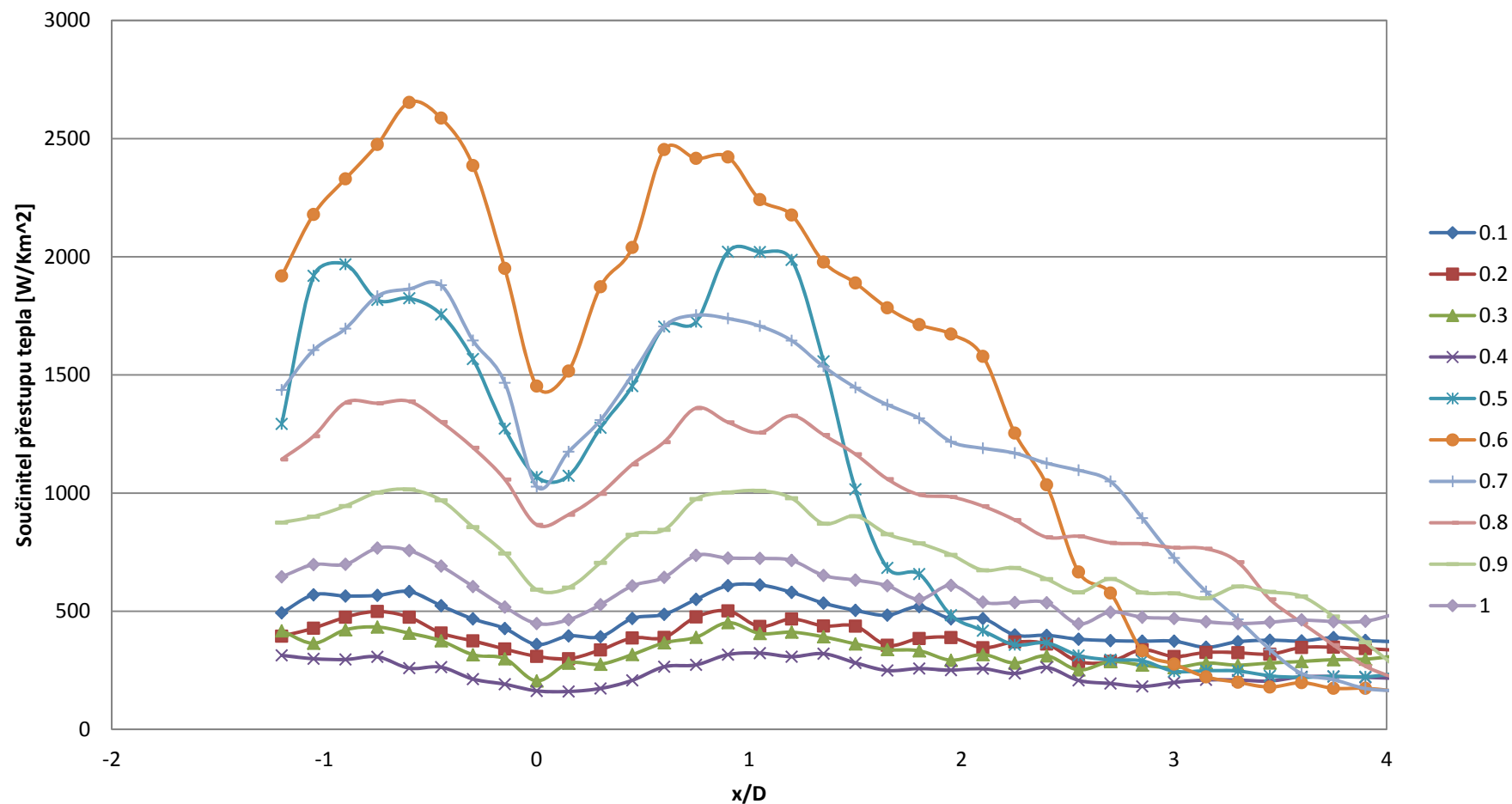
Intenzita turbulencí ve vzdálenosti  $y/D = 2$  od ústí trysky



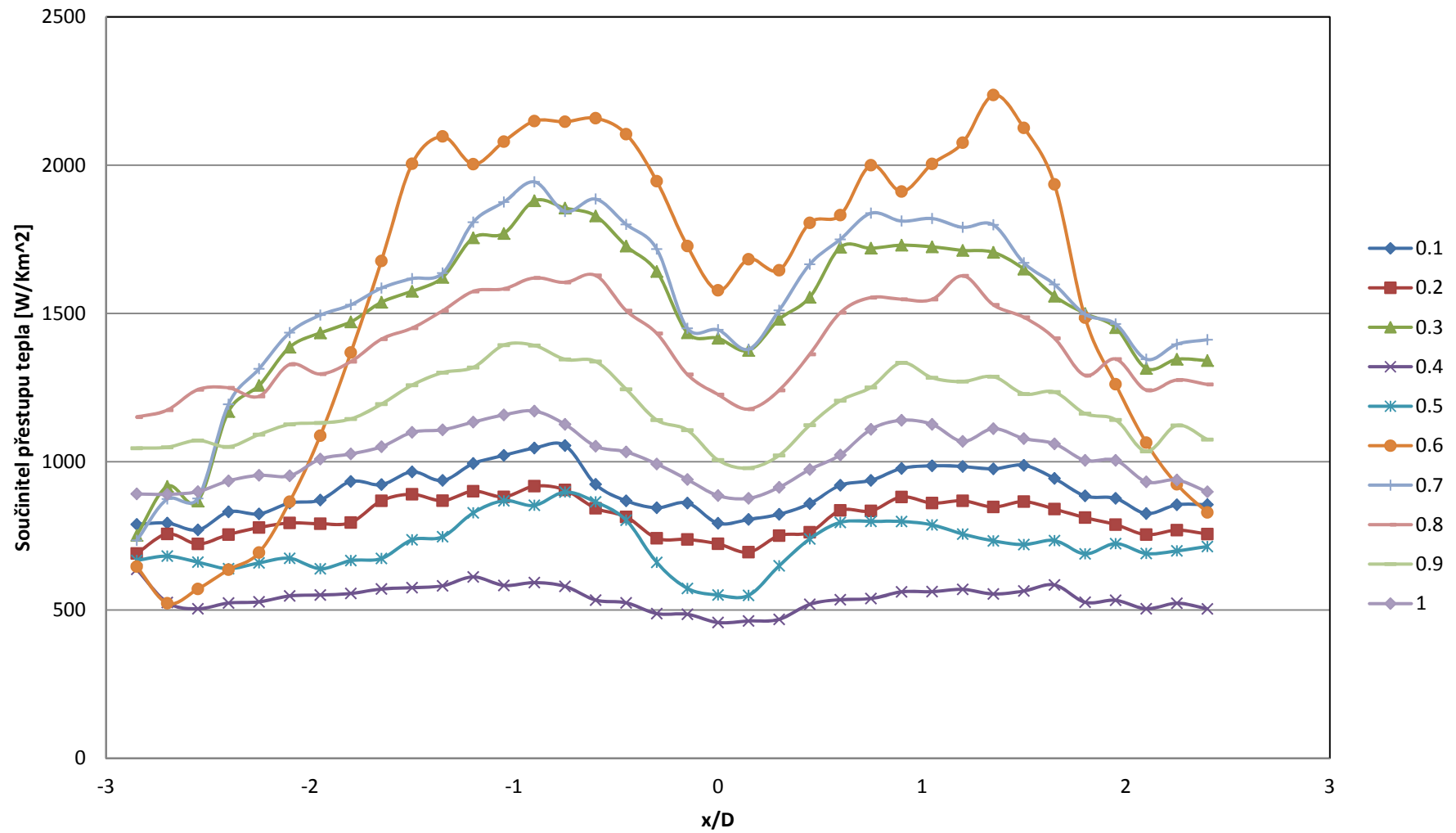
Intenzita turbulencí ve vzdálenosti  $y/D = 4$  od ústí trysky

## **Příloha 6** Součinitel přestupu tepla

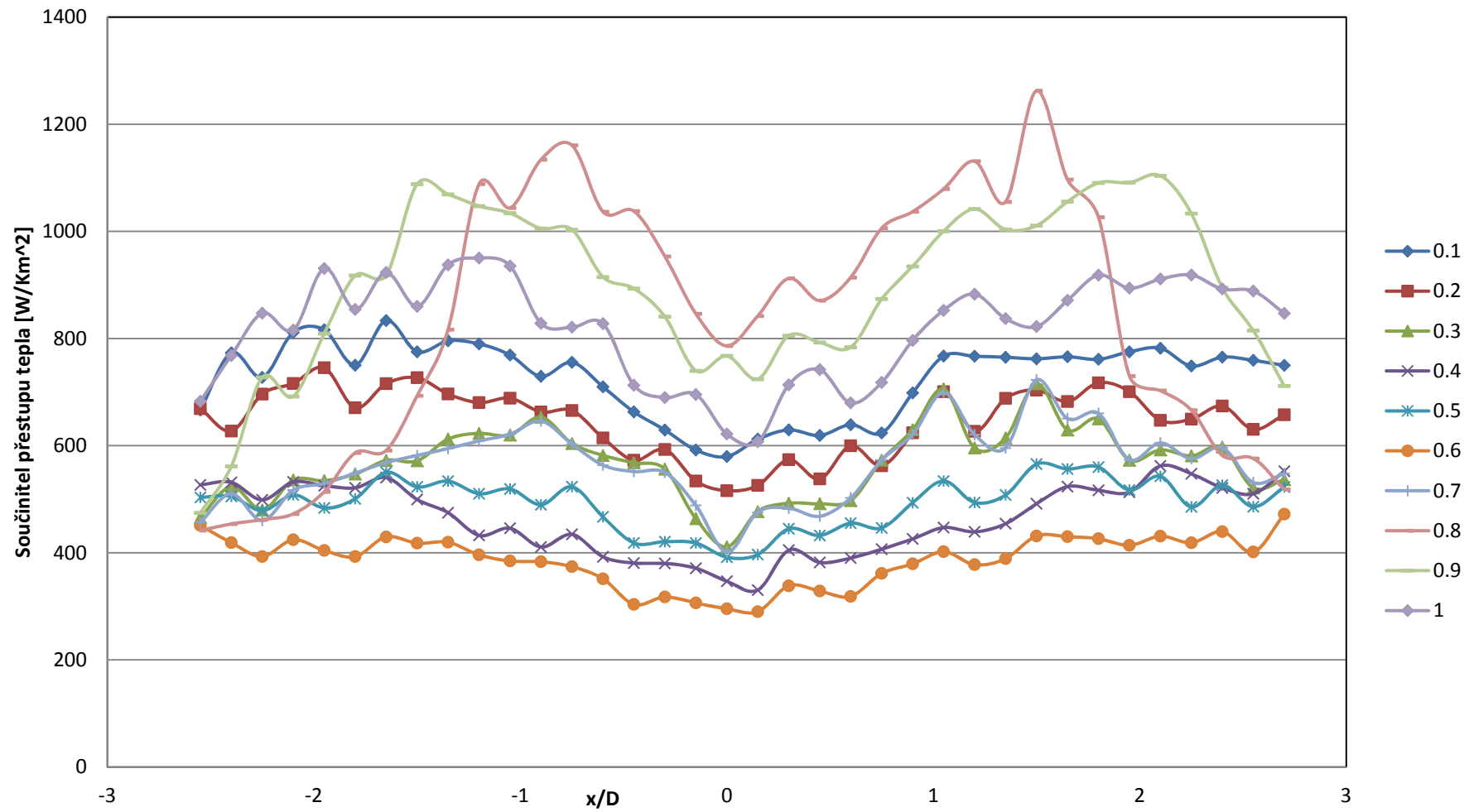
Součinitel přestupu tepla 3,5 cm od trysky



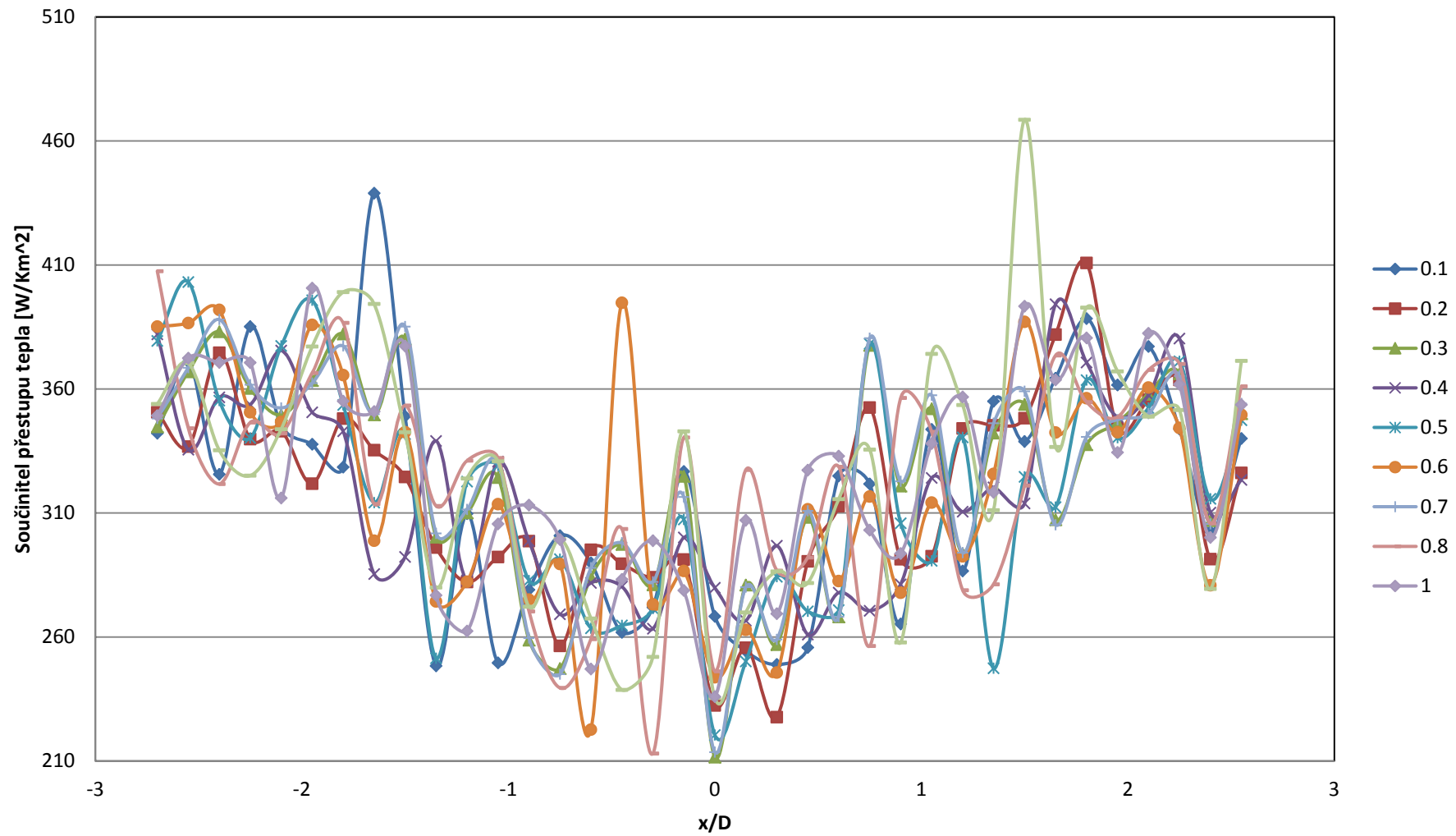
Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D = 3,5$  od trysky



Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D=5$  od trysky



Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D = 10$  od trysky



Součinitel přestupu tepla ve vzdálenosti  $y/D = 20$  od trysky

## **Příloha 7** Procedura na zpracování výsledků v sw MatLab



```

function [period] = rozdeleni ( data )
k=0
for i= 1:1:size(data,1) % Zjištění času 0 a zaznamenání místa v tabulce

    if data(i,1)==0 ,k=k+1 , poloha(k,1)=i
    end
end

for j=1:1:(size(poloha,1)-1) % nalezení náběžné hrany TTL signálu
    l=0

    for m=(poloha(j,1)+1):(poloha(j+1,1))
        if (data(m,3)<1) & (data(m+1,3)>3), l=l+1, ttl(l,j)= m,
        end
    end
end
period=zeros(11,(size(ttl,2)))
for p=1:1:size(ttl,2) %samotný výpočet střední hodnoty rychlosti v deseti částech TTL signálu
    c=0
    for h= 1:1:((size(ttl,1))-4)
        if ttl(h,p)>0 c=c+1
        end
        faze=0

        for n= ttl(h,p):abs((ttl((h+1),p))-ttl(h,p))/10:ttl((h+1),p) ,faze=faze+1
            if ttl((h+1),p)==0 , period(faze,p)= period (faze,p)
            else period (faze,p) = period (faze,p)+mean(data((n:(n+1)),2))
            end

        end

    end
    period (1:end,p)=period(1:end,p)/c
end

end

```